

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Karolis JANUŠEVIČIUS

TERMODINAMINĖS ANALIZĖS TAIKYMAS TERMOHIDRODINAMINIŲ KONTŪRŲ SYSTEMOMS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MECHANIKOS INŽINERIJA (T 009)



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2019

Disertacija rengta 2013–2019 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. dr. Arnas KAČENIAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. dr. Dalius MAŽEIKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009).

Nariai:

prof. habil. dr. Dagnija BLUMBERGA (Rygos technikos universitetas, Latvija, energetika ir termoinžinerija – T 006),

doc. dr. Sergejus BORODINAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009),

doc. dr. Artūras KILIKEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009),

dr. Raimondas PABARČIUS (Lietuvos energetikos institutas, energetika ir termoinžinerija – T 006).

Disertacija bus ginama viešame Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2019 m. birželio 10 d. 14 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2019 m. gegužės 9 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2019-018-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-476-170-6

DOI: 10.20334/2019-018-M

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2019

© Karolis Januševičius, 2019

karolis.janusevicius@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Karolis JANUŠEVIČIUS

APPLICATION OF THERMODYNAMIC ANALYSIS FOR THERMOHYDRODYNAMIC LOOPS SYSTEMS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MECHANICAL ENGINEERING (T 009)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2019

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2013–2019.

Supervisor

Prof. Dr Arnas KAČENIAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Mechanical Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Dalius MAŽEIKA (Vilnius Gediminas technical university, Mechanical engineering – T 009).

Members:

Prof. Dr Habil. Dagnija BLUMBERGA (Riga Technical University, Latvia, Energetics and Power Engineering – T 006),

Assoc. Prof. Dr Sergejus BORODINAS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009),

Assoc. Prof. Dr Artūras KILIKEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009),

Dr Raimondas PABARČIUS (Lithuanian Energy Institute, Energetics and Power Engineering – T 006).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Mechanical Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **2 p. m. on 10 June 2019**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania. Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 9 May 2019. A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje, naudojant taikomosios termodinaminės analizės metodus, nagrinėjamos termohidrodinaminių kontūrų sistemos efektyvumo didinimo problemos. Šio darbo tikslas – sukurti termohidrodinaminių kontūrų sistemos sezoninio termodinaminio efektyvumo nustatymo metodą ir suformuluoti metodiką siekiant sistemingai didinti sezoninį efektyvumą. Sukurto metodo ir metodikos taikymo sritis – tiriamoji veikla ir inžinerinė praktika – orientuota į tvarių energinių sistemų kūrimą, eksploataciją ir tobulinimą. Disertacijoje taip pat siekiama sumažinti atotrūkį tarp tiriamojoje mokslineje ir inžinerinėje praktikoje naudojamų taikomosios termodinaminės analizės metodų.

Darbo tikslui pasiekti, sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: termodinaminės analizės taikymo problematikos identifikavimas, termodinaminio sezoninio efektyvumo (TSE) vertinimo metodo sudarymas, modeliavimui reikalingo detalumo lygio identifikavimas ir TSE tobulinimo metodikos sudarymas eliminuojant kritinius trukdžius.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai ir vienuolika priedų.

Įvadiniamame skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai ir analizei. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pateiktas termodinaminio sezoninio efektyvumo nustatymo metodas, skirtas apskaičiuoti specifinius efektyvumo atvejus, ir sezoninio efektyvumo gerinimo metodika.

Trečiajame skyriuje pateikiama tiriamos sistemos analizės pavyzdys, iliustruojantis TSE nustatymo ir jo tobulinimo metodų funkcionalumą.

Disertacijos tema paskelbti 9 straipsniai: 2 – Clarivate Analytics Web of Science duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose, turinčiuose citavimo rodiklį (Martinaitis et al. 2017, Januševičius et al. 2019), 1 – tarptautinių konferencijų leidiniuose, referuojamuose Clarivate Analytics duomenų bazėje Proceedings (Januševičius et al. 2014a). 6 – kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose (Januševičius et al. 2016; Januševičius et al. 2015; Januševičius, Streckienė 2015; Januševičius, Streckienė 2013; Bielskus et al. 2013). 2 – konferencijų pranešimų medžiagoje (Januševičius et al. 2014a, Januševičius et al. 2014b). Disertacijos tema perskaityti 3 pranešimai tarptautinėse konferencijose Lietuvoje, Latvijoje ir Jungtinėje Karalystėje.

Abstract

Dissertation deals with problems of the thermohydrodynamic contours system, using the methods of applied thermodynamic analysis. The main research object is the energy services supply system, which ensure thermal comfort and provides energy services to the users of the building. The main aim of the dissertation is to develop methodologies for the evaluation of seasonal thermodynamic efficiency and for the processing and analysis of the generated indicators. Scope of the developed methods - research and engineering practice focuses on the development and improvement of sustainable energy systems. The dissertation also aims to reduce the gap between methods of applied thermodynamic analysis used in the research and engineering practice.

The aim of the work is to create a method for seasonally effective evaluation of the thermohydrodynamic system and to formulate a methodology for systematic increase of this size. To accomplish this, several main tasks are solved: identification of the application of the thermodynamic analysis, determination of the method for the thermodynamic seasonal efficiency (TSE), the identification of the level of detail required for modeling, and the creation of a TSE improvement methodology by eliminating critical interruptions.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, summary in English, list of used literature and author's publications, and eleven appendices.

The introductory chapter discusses the research problem, the relevance of the work, describes the object of the research, formulates the aim and tasks of the work, describes the research methodology, the scientific novelty of the work, the practical significance of the work results, and the defended statements. At the end of the introduction the publications and reports published by the author of the dissertation and the structure of the dissertation are presented.

The first chapter is devoted to literature review and analysis. At the end of the chapter, conclusions are formulated and the tasks of the dissertation are refined.

The second chapter presents a thermodynamic seasonal efficiency method for calculating specific efficiency cases, and seasonal efficiency improvement methodology.

The third chapter provides an example of the analysis of the system under study illustrating the functionality of the seasonal efficiency determination and its improvement methodology.

The subject of the dissertation is published in 9 articles: 2 is in the collection of articles included in the list of Clarivate Analytics Web of Science, 1 in the conference materials listed in the Proceedings database, 6 in the magazine cited in the Inspec database, 3 in the reviewed international conference materials

Žymėjimai

Simboliai

E – energija, kJ;

Q – šilumos srautas, kJ;

W – termodinaminis mechaninis darbas, kJ;

h – entalpija, kJ;

Ex – srauto eksergija arba eksergijos kiekis, kJ;

L – sunaikinta eksergija, kJ ;

e – savitoji eksergija masės vienetui, kJ/kg;

S – entropijos kiekis, kJ ;

s – savitoji entropija masės vienetui, kJ/kg;

T – temperatūra, K;

Cp – Šiluminė talpa, kJ/kg;

cp – savitoji šiluminė talpa, kJ/kgK;

P – slėgis, Pa;

ρ – tankis, kg/m³.

Indeksai

gen – sugeneruotas (pagamintas) kiekis;
genD – generuojamas termodinaminis dydis dėl fluidų dinamikos reiškinių;
genC – generuojamas termodinaminis dydis dėl šiluminio laidumo reiškinių;
in – per kontrolinio tūrio ribas įtekantis srautas;
out – iš kontrolinio tūrio ribų ištekantis srautas;
m – mechaninės kilmės dydis;
T – temperatūrinės kilmės dydis;
Ch – cheminės kilmės dydis;
a – apsupties sąlygos;
r – patalpos sąlygos;
g – grunto parametrai;
cv – kontrolinio tūrio ribos;
f – fluidas;
i – laiko žingsnis;
k – sistemos arba posistemio elementas;
t – laiko žingsnis;
n – elementas, komponentas arba dedamoji;
add – papildomas energijos srautas;
hs – šildymo sistemos;
cs – vėsinimo sistemos;
vent – vėdinimo sistemos;
DHW – karšto vandens ruošimo sistemos;
FCU – ventiliatoriniai konvektoriai (angl. *fan coil*);
fans – ventiliatoriai;
pumps – cirkuliaciniai siurbliai.

Santrumpos

THDK – termohidrodinaminis kontūras (-ai);
AEI – Atsinaujinantys energijos ištekliai;
SFD – Skaičiuojamoji fluidų dinamika (angl. *Computational Fluid Dynamics*);
FD – Fluidų dinamika (angl. *Fluid Dynamics*);
ŠM – šilumos mainai (angl. *Heat Transfer*);
GCA – Gyvavimo ciklo analizė (angl. *Life cycle analysis*);
PTD – Pirmasis termodinamikos dėsnis;

EGM – Entropijos generavimo minimalizavimas;

ATD – Antrasis termodinamikos dėsnis;

TSE – Termodinaminis sezoninis efektyvumas.

Sąvokos

Energetinė paslauga – fizinė nauda, naudingumas ar gėrybė, sukuriamą derinant energiją su energetiškai efektyvia technologija ar veiksmu, kuris gali apimti eksploatavimą, techninę priežiūrą ir kontrolę, būtinus teikiant paslaugą, pagal sutartį ir kurios teikimo įprastinėmis sąlygomis atsirado patikrinamas ir išmatuojamas ar apskaičiuojamas energijos vartojimo efektyvumo padidėjimas ar sutaupyta pirminės energijos.

Technologija – sąvoka, apibūdinanti išteklių (intelektinių ir pan.) praktinį taikymą, dažniausiai sukuriant virtualų (programinę įrangą, algoritmai, metodikos procesai ir pan.) ar materialų objektą (techniką). Technologija taip pat reiškia žmogaus sukurtą bet kokios tikslingos veiklos produktų ir procesų visumą.

Sistema – tarpusavyje susietų ir sąveikaujančių komponentų rinkinys atliekantis apibrėžtą funkciją

Efektyvumas – resursų reikalingų funkcijai atlikti santykis su faktiškai sunaudojamais resursais, įtraukiant sąnaudas dėl proceso neidealumo ir/arba naudos neatnešančių srautų.

Metrika (angl. *Metric*) – skaitinė išraiška atspindinti matavimo sistemą arba standartą. Sąvoka apibendrinanti tiesioginius ir išvestinius rodiklius, indeksus, indikacines vertes ir kitus dydžius naudojamus charakterizuoti proceso, sistemos ar komponento savybės, elgseną

Metodas – konkreti procedūra skirta įvykdyti specifiniam veiksmui bei dažniausiai turinti sistemingą ir apibrėžtą eigą.

Inžinerinė praktika – specifinėje šakoje standartiškai (dažniausiai) taikomų metodų, priemonių ir technologijų rinkinys, naudojamas reikalingam produktui ar rezultatui sukurti, tikslams įgyvendinti.

Energinė analizė – energijos srautų analizė, taikant pirmąjį termodinamikos dėsnį, nustatanti kiekybines išraiškas, efektyvumo rodiklius ir kitas išvestines metrikas.

Termodinaminė analizė – energijos ir eksergijos srautų analizė taikant pirmąjį ir antrąjį termodinamikos dėsnius.

Sisteminė analizė – vienos arba keleto disciplinų atliekama analizės procedūra nagrinėjanti tarpusavyje sąveikaujančius komponentus kaip sistemą turinčią paskirtį ir funkciją (tikslą).

Modelis (angl. *Model*) – realaus proceso, sistemos arba komponento virtuali kopija atkartojanti savybes ir elgseną. Naudojama imituoti, analizuoti ir prognozuoti realaus analogo savybes.

Modeliavimas (angl. *Modeling*) – modelio kūrimas, skaičiuojamųjų procedūrų atlikimas siekiant gauti nustatytą rezultatą.

Validavimas – atitikties su reikalavimais patikros procedūra, nustatant korektiškumą masės tvermės, termodinamikos ir šilumos mainų dėsniams, kitoms apibrėžtomis taisyklėms

Verifikavimas – atitikties su realiu procesu patikros procedūra, nustatanti parametrų atotrūkį tarp modeliuojamo ir realaus analogo.

Detalumas (angl. *Detailness*) – geometrinio ir/arba fizikinio supaprastinimo laipsnis taikomas modelyje, įvertinamas dimensijų, skaičiuojamųjų taškų, vertinamų fizikinių reiškinių ir tarpusavio sąveikų kiekiu.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodai	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai.....	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	6
 1. TERMOHIDRODINAMINIŲ KONTŪRŲ VERTINIMO IR TOBULINIMO METODAI	 7
1.1. Energinių paslaugų sistemų analizės metodai	9
1.1.1 Termohidrodinaminių kontūrų tyrimui naudojami metodai	12
1.1.2. Skirtumai tarp Pirmojo ir Antrojo termodinamikos dėsnių	14
1.1.3. Termodinaminės analizės nauda.....	17
1.2. Modeliavimo detalumo dimensijos.....	18
1.2.1. Sistemos dekompozicija	20
1.2.2. Modelio kompleksiškus.....	21

1.2.3. Laiko periodai, naudojami modeliavimo metuose	23
1.3. Termodinaminės analizės metodų taikymas	24
1.3.1. Taikymo tikslų ir motyvų analizė	25
1.3.2. Termodinaminės analizės taikymo apribojimai	27
1.4. Analizės proceso efektyvumas ir rezultatyvumas	33
1.4.1. Efektyvumo didinimo galimybės	34
1.4.2. Neapibrėžtumas ir tikslumas	36
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	37
 2. TERMODINAMINIO SEZONINIO EFEKTYVUMO NUSTATYMO IR GERINIMO METODAS	39
2.1. Termodinaminio sezoninio efektyvumo gerinimo metodika	40
2.1.1. Sistemos lygmuo (L1)	42
2.1.2. Posistemių lygmuo (L2)	43
2.1.3. Komponentų grupių lygmuo (L3)	45
2.1.4. Komponentų lygmuo (L4)	46
2.1.5. Vidinės konfigūracijos lygmuo (L5)	46
2.2. Termodinaminis šilumos mainų ir skysčių mechanikos procesų vertinimas	47
2.2.1. Termodinaminės analizės taikymas	48
2.2.2. Generavimo ir energetinių paslaugų kokybinių poreikių apibrėžimas	52
2.2.3. Nestandartiniai termodinaminio efektyvumo atvejai	54
2.2.4. Termodinaminės analizės metodų integracija modeliavimo detalume	55
2.3. Termodinaminis sezoninis sistemos efektyvumas	56
2.3.1. Termodinaminio sezoninio efektyvumo dekompozicija	58
2.3.2. Nesusietų ir susietų posistemių poveikis sistemos efektyvumui	59
2.3.3. Lygiagrečių komponentų integracija į nuoseklią grandinę	62
2.3.4. Termodinaminio sezoninio efektyvumo rodiklio etalonai ir atskaitos sistema	63
2.4. Realus tobulinimo potencialas	65
2.5. Analizės metodais gaunamos informacijos agregavimas	67
2.5.1. P0 Efektyviausios alternatyvos faktorius	70
2.5.2. P1 kritinių periodų, turinčių neigiamą poveikį sezoniniam efektyvumui identifikavimas	71
2.5.3. P2 kritinių sistemos elementų identifikavimas	72
2.5.4. P3. Elementų, darančių didžiausią neigiamą poveikį kitiems sistemos komponentams nustatymas	73
2.5.5. P4. Didžiausią tobulinimo potencialą turinčių komponentų, kuriems yra tikslingas tobulinimas, identifikavimas	74
2.6. Termodinaminės analizės metodų adaptacija ir modifikacijos termohidrodinaminių kontūrų sistemos analizei	75
2.7. Efektyvumo įvertinimo apibrėžimas	78
2.8. Antrojo skyriaus išvados	80
 3. TERMODINAMINIO SEZONINIO EFEKTYVUMO NUSTATYMAS IR DIDINIMO METODO TAIKYMAS	81

3.1. Pradinės sąlygos ir nagrinėjamas atvejis	82
3.2. Analizuojama sistema	85
3.2.1. Sistemos lygmenyje (L1) atliekama analizė	85
3.2.2. Posistemių lygmenyje (L2) atliekama analizė	90
3.2.3. Komponentų grupių lygmenyje (L3) atliekama analizė	99
3.2.4. Komponentų lygmenyje (L4) atliekama analizė	105
3.2.5. Pagal sąlygų atsikartojimo dažnį apskaičiuojamo termodinaminio sezoninio efektyvumo atvejis	109
3.2.6. Komponentų realus tobulinimo potencialas	112
3.2.7. Vidinės konfigūracijos lygmenyje (L5) atliekama analizė	113
3.2.8. Neįkrautos akumuliacinės talpos įkrovimas (A sąlygos)	118
3.2.9. Talpos su pradinio temperatūriniu gradientu įkrovimas (B sąlygos)	120
3.3. Metodikos efektyvumo įvertinimas	121
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	124
 BENDROSIOS IŠVADOS	127
 LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	129
 AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	143
 SUMMARY IN ENGLISH	145
 PRIEDAI ¹	159
A priedas. Ekserginės analizės taikymą mininčių straipsnių sąrašas	161
B priedas. Komponentų termodinaminės analizės modeliai	167
C priedas. Termodinaminio sezoninio efektyvumo apibrėžimas	178
D priedas. Komponentų grandinės integracijos koeficientas	180
E priedas. Taikomosios termodinaminės analizės metodai (santrauka)	183
F priedas. Energetinių paslaugų kokybinių poreikių apibrėžimas	189
G priedas. Energetinių paslaugų generavimo šrautų kokybinės išraiškos	191
H priedas. Sistemų etalonų charakteristikos	192
I priedas. Sąžiningumo deklaracija	197
J priedas. Bendra autorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą mokslo daktaro disertacijoje	198
K priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	203

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem	1
Relevance of the thesis	2
The object of research	3
The aim of the thesis	3
The tasks of the thesis	3
The research methods	3
Scientific novelty of the thesis	4
Practical value of the research findings.....	4
The defended statements	5
Approval of the research findings	5
The structure of the dissertation	6
1. THE METHODS USED TO ASSESS AND IMPROVE THERMOHYDRODYNAMIC LOOPS	7
1.1. The analysis methods of energy service systems	9
1.1.1. Methods used for thermohydrodynamic loops	12
1.1.2. Differences between the First and the Second laws of Thermodynamics	15
1.1.3. Benefits of thermodynamic analysis	17
1.2. Detailness level of modeling.....	19
1.2.1. System decomposition.....	20
1.2.2. The complexity of the model.....	21

1.2.3. Time periods used in modeling	23
1.3. Application of methods of thermodynamic analysis	24
1.3.1. Analysis of application goals and motives	25
1.3.2. Limitations of thermodynamic analysis application	27
1.4. Efficiency and effectiveness of the analysis process.....	33
1.4.1. Opportunities to improve the efficiency.....	34
1.4.2. Uncertainty and accuracy	36
1.5. Conclusions of the first chapter and task formulation for thesis.....	37
 2. THERMODYNAMIC SEASONAL EFFICIENCY ASSESSMENT AND METHOD FOR INCREASING PERFORMACE	39
2.1. Thermodynamic seasonal efficiency improvement methodology.....	40
2.1.1. System level (L1)	42
2.1.2. Subsystem level (L2).....	43
2.1.4. Component group level (L3)	45
2.1.5. Component level (L4)	46
2.1.6. Internal configuration level (L5)	47
2.2. Thermodynamic assessment of heat transfer and fluid mechanic process	47
2.2.1. Application of thermodynamic analysis	48
2.2.2. Definition of generation and energy service quality demands.....	53
2.2.3. Non-standard cases of thermodynamic efficiency.....	54
2.2.4. Integration of thermodynamic analysis methods in the context of modeling detail	55
2.3. Thermodynamic seasonal efficiency of a system.....	56
2.3.1. Decomposition of thermodynamic seasonal efficiency	59
2.3.2. Impact of separate and integrated subsystems on system efficiency	60
2.3.3. Integration of parallel components into a coherent chain.....	62
2.3.4. The bechmarks of the thermodynamic seasonal efficiency on control volume and reference system.....	63
2.4. Real improvement potential	65
2.5. Aggregation of information obtained by analysis	67
2.5.1. The most effective alternative factor (P0)	70
2.5.2. Identification of critical periods with negative impact on seasonal performance (P1)	71
2.5.3. The identification of critical system component (P2).....	72
2.5.4. Identifying elements that have the most negative impact on other system components (P3)	73
2.5.5. Identification of the components with the highest potential for improvement and targeted improvement (P4)	74
2.6. Adaptation of thermodynamic analysis methods and modifications for the analysis of thermohydrodynamic contour system	75
2.7. Definition of effectiveness evaluation	78
2.8. Conclusions of the second chapter	80

3. APPLICATION OF METHODS FOR ASSESSING THERMODYNAMIC SEASONAL EFFICIENCY AND INCREASING PERFORMACE.....	81
3.1. Initial conditions and case under consideration	82
3.2. Case study	85
3.2.1. The analysis at system level (L1)	85
3.2.2. The analysis at subsystem level (L2)	90
3.2.3. The analysis at component group level (L3)	99
3.2.4. The analysis at component level (L4)	105
3.2.5. The case of thermodynamic seasonal efficiency calculated according to the frequency of recurrence	110
3.2.6. Real improvement potential of components	112
3.2.7. The analysis at internal configuration level (L5)	114
3.2.6. The charge of uncharged accumulation tank (A conditions)	119
3.2.7. The charge of accumulation tank with initial stratification (B conditions) ..	120
3.3. The computational cost of TSE improvement methodology.....	122
3.4. Conclusions of the third chapter	124
GENERAL CONCLUSIONS	127
REFERENCES	129
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DOCTORIAL DISSERTATION	143
SUMMARY IN ENGLISH.....	145
ANNEX ²	159
Annex A. Articles referring to the application of exergy analysis	161
Annex B. Models of thermodynamic analysis of components	167
Annex C. The definition of thermodynamic seasonal efficiency	178
Annex D. The factor of component chain integration	180
Annex E. Methods of applied thermodynamic analysis	183
Annex F. The definition of qualitative needs for energy services	189
Annex G. Qualitative expressions of energy service generation flows	191
Annex H. The characteristics of system benchmark	192
Annex I. Authors declaration of academic integrity.....	197
Annex J. The co-authors agreements to present publications material in dissertation.....	198
Annex K. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation.....	203

² The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Įvadas

Problemos formulavimas

Augant tvariosios plėtros svarbai, energetinėse sistemose, naudojančiose atsinaujinančią ir iškastinio kuro energiją, tampa svarbu suderinti gamybos galimybes ir vartojimą. Svarbu bendrame balanse išlaikyti kuo didesnę atsinaujinančių išteklių dalį. Šių procesų nagrinėjimas ir efektyvinimas tvariosios plėtros aspektu reikalingas įgyvendinant Europos Sąjungos strateginius tikslus, išskeltus 2010/31/EU, 2009/28/EC direktyvose ir technologijų plėtojimo gairėse (angl. *Roadmaps*), nurodančiose atsinaujinančios energijos plėtojimo kryptis ir tikslus šalims narėms.

Energijos kokybės nuostoliai, patiriami generavimo įrenginiuose, daugelyje šaltinių yra įvardijami kaip kritiniai ir darantys didžiausią įtaką energijos tiekimo grandinės efektyvumui (Schmidt 2009, Hepbasli 2012). Priklausomai nuo pasirinkto energijos nešėjo kokybinės vertės bei sukuriamo produkto – energijos kokybės – yra išreiškiamas termodinaminis naudingumas ir efektyvumas. Daugelio tyrėjų išvadose pateikiamos rekomendacijos rinktis žemos temperatūros režimu veikiančius įrenginius, kurių termodinaminis efektyvumas atitinkamai yra efektyviausias dėl mažo skirtumo tarp apsupties ir įrenginio darbinės temperatūros.

Pastebėta, kad trūksta metodų, tinkančių sistemoms, pasižyminčiomis per laiką kintančiomis kraštinėmis sąlygomis, projektuoti. Egzistuojančios metodikos koncentruojasi į komponentų dydžių nustatymą ir minimaliai atsižvelgia į bendrą sistemos efektyvumo lygio užtikrinimą. Skiriama per mažai dėmesio energijos kokybės lygiui ir veiksniams, sukeliantiems energijos kokybės nuvertėjimą. Darbo problematika vystoma skysčių mechanikos, šilumos mainų ir termodinamikos mokslų sankirtoje.

Darbo aktualumas

Siekiant mažinti klimato kaitą ir jos padarinius, Jungtinių Tautų iniciatyva nuo 1992 m. Rio de Žaneire (Jungtinės Tautos 1992) vykusios asamblėjos dėl tvarumo ir klimato kaitos, buvo pasirašyti Kyoto (Jungtinės Tautos 1998) ir Paryžiaus (Jungtinės Tautos 2015) susitarimai dėl siekiamų šiltnamio efektą sukuriančių dujų emisijų ribojimo. Darniosios plėtros svarbą taip pat išryškina keliama strateginiai tikslai 2030 metams (Jungtinės Tautos 2017).

Pagal Europos Sąjungos statistiką iki 50% suvartotos galutinės energijos (Europos komisija 2016) sudaro energijos poreikis pastatams. Tai generuoja anglies dvideginio emisijas, kurios sukelia klimato kaitą (IPCC 2018). Gyvavimo ciklo požiūriu, didžioji pirminės energijos dalis (nuo 30–50 iki 90 %) suvartojama pastato inžinerinėse sistemose (Avgelis, Papadopoulou 2009; Kofoworola, Gheewala 2009). Todėl resursų suvartojimo mažinimas yra strateginė priemonė kovai su klimato kaita. Intensyvus energijos naudojimas yra susijęs su neefektyviu pastato inžinerinėse sistemose vykstančių procesų naudojimu (Misevičiūtė 2015) ir juose susidaranciais energijos kokybės nuostoliais (Torio 2007). Pastatuose susidarantys energijos srautai skiriasi ne tik kiekybiniais, bet ir kokybiniais parametrais. Analizuojant į pastatą tiekiamų ir jo viduje susidarantių srautų efektyvumo didinimo galimybes, būtina taikyti naują, energijos kokybinius parametrus identifikuojantį metodą (Biekša 2008).

PTD ir ATD paremtų metodų taikymo rezultatyvumo didinimas sukuria galimybę planuoti, projektuoti ir vystyti didesnę tvarumo laipsnį turinčias inžinerines sistemas. Šiais metodais leidžiama teisingai palyginti ATD požiūriu skirtingus energijos (rūšių) srautus, analizuoti bei užtikrinti darnios energetikos plėtros procesą. (Dincer, Rosen 2007, Biekša 2008).

Termodinaminio sezoninio efektyvumo nustatymas leistų skatinti tvariosios plėtros prieinamumą, o šio rodiklio gerinimo metodas įgalintų priimti aukštesnės kokybės sprendimus siekiant sistemingai mažinti neigiamą pastatų poveikį aplinkai.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – termohidrodinaminių kontūrų sistema, teikianti energetines paslaugas ir sistemos sezoninis termodinaminis efektyvumas.

Darbo tikslas

Šio darbo tikslas – sukurti metodiką, įgalinančią sistemingai didinti termohidrodinaminių kontūrų sistemos sezoninį efektyvumą.

Darbo uždaviniai

Tam, kad būtų pasiektas darbo tikslas, svarbu išspręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti mokslinių tyrimų analizę: nustatyti termodinaminės analizės metodų taikymo spragas.
2. Sukurti sezoninio termodinaminio efektyvumo vertinimo metodą sistemai, susidedančiai iš termohidrodinaminių kontūrų.
3. Nustatyti skaitinių modelių detalumo lygį, reikalingą objektyviai įvertinti sezoninius rodiklius ir atpažinti efektyvumo didinimo trukdžius.
4. Sudaryti metodinę veiksmų seką, tinkamą nuosekliai didinti sistemos efektyvumą, identifikuojant kritinius trukdžius.
5. Pritaikyti sudarytą metodiką praktiniam termohidrodinaminių kontūrų sistemos atvejo tyrimui.

Tyrimų metodai

Darbe naudojami metodai: termodinaminė analizė, išplėstinė termodinaminė analizė, entropijos generavimo minimizavimas, sisteminė analizė, lokalios entropijos generavimo analizė. Modeliuojant naudotasi TRNSYS, IES VE, MATLAB, COMSOL programinės įrangos paketais.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją, buvo gauti šie mechanikos inžinerijos ir termoinžinerijos mokslo šakoms nauji rezultatai:

1. Suformuotas termodinaminio sezoninio efektyvumo skaičiavimo metodas, tinkamas kintančioms termodinaminėms apsuptyms sąlygoms.
2. Apibrėžtas realiai įmanomas tobulinimo potencialas sistemos komponentams.
3. Suformuota termohidrodinaminių kontūrų sistemos analizės metodika, leidžianti identifikuoti kritines dedamąsias ir laikotarpius, taikyti korekcinis veiksmus pasirenkant adekvatų modelio dekompozicijos lygį ir detalumą.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Sisteminis taikomosios termodinaminės analizės metodų taikymas pasirenkant adekvatų modelio detalumo ir sistemos dekompozicijos lygį, padeda sumažinti skaičiuojamąsias sąnaudas analizei atlikti. Sudaryta metodika gali būti tinkama kaip proceso pavyzdys taikant praktiškai, tobulinant procesą, siekiant padidinti procedūrų sekos efektyvumą ir rezultatyvumą atliekant pagrindinę funkciją. Suformuotas metodas padeda išvengti neracionalaus laiko ir skaičiuojamųjų sąnaudų švaistymo nukreipiant pastangas į komponentų, turinčių didžiausią poveikį TSE rodikliui.

Suformuoti rodikliai gali būti nepriklausomai naudojami kaip metrikos sistemos ir jos komponentų našumui apibrėžti išreiškiant sistemos, posistemių, atskirų jos komponentų kritines vietas ir laiko žingsnius, kuriuose reikalingi korekciniai veiksmai efektyvumui padidinti.

Realaus tobulinimo potencialo dydis leidžia nustatyti komponento detalesnės analizės tikslumą ir galimybes padidinti šio termodinaminį efektyvumą. Šie veiksmai sudaro galimybę integruoti skaičiavimo metodus į programinės įrangos paketus, naudojamus inžinerinėje praktikoje. Integracija į plačiai naudojamus programinės įrangos paketus didintų termodinamikos metodų prieinamumą ir taikomumą.

Ginamieji teiginiai

1. Termodinaminis sezoninis efektyvumas yra tinkamas išreikšti termohidrodinaminės sistemos tvarumo indeksą. Pateiktas metodas įgalina analizuoti ir nustatyti sistemos efektyvumą mažinančius laiko žingsnius ir efektyvumą mažinančių veiksnių kilmę.
2. Modeliuojamos sistemos nuoseklus detalumo didinimas leidžia užtikrinti efektyvų analizės procesą. Didžiausią poveikį sezoniniam efektyvumui turinčių komponentų radimas padidina analizės proceso rezultatyvumą.
3. Sudaroma atskaitos sistema, kuri leidžia objektyviai palyginti analizuojamos sistemos termodinaminį sezoninį efektyvumą su ribiniais etalonais. Informacija apie termohidrodinامينius procesus ir entropijos generavimą leidžia nustatyti didžiausią galimą komponento efektyvumą.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema paskelbti 9 straipsniai: 2 – Clarivate Analytics Web of Science duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose, turinčiuose citavimo rodiklį (Martinaitis et al. 2017, Januševičius et. al 2019), 1 – tarptautinių konferencijų leidiniuose, referuojamuose Clarivate Analytics duomenų bazėje Proceedings (Januševičius et al. 2014a). 6 – kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose (Januševičius et al. 2016; Januševičius et al. 2015; Januševičius, Streckienė 2015; Januševičius, Streckienė 2013; Bielskus et al. 2013). 2 – konferencijų pranešimų medžiagoje (Januševičius et al. 2014a, Januševičius et al. 2014b).

Disertacijos tema perskaityti 3 pranešimai tarptautinėse konferencijose Lietuvoje, Latvijoje ir Jungtinėje Karalystėje:

- Tarptautinėje konferencijoje Lietuvoje (*10th International Conference „Environmental Engineering“* 2014, Vilnius, Lietuva);
- Tarptautinėje konferencijoje užsienyje (*The Conference of Environmental and Climate Technologies CONECT 2015*, Ryga, Latvija);
- Tarptautinėje konferencijoje užsienyje (*Energy Chalanges and Mechanics 6–th International Conference*, Jungtinė Karalystė).

Disertācijas struktūra

Disertāciju sudaro ievads, trīs skyrii ir bendrosios iřvados. Taip pat yra vienuolika priedų.

Darbo apimtis – 128 puslapiai, neskaitant priedų. Tekste panaudotos 79 numeruotos formulės, 57 paveikslai ir 20 lentelių. Rařant disertaciją buvo remtasi daugiau kaip 170 literatūros šaltiniais.

Termohidrodinaminių kontūrų vertinimo ir tobulinimo metodai

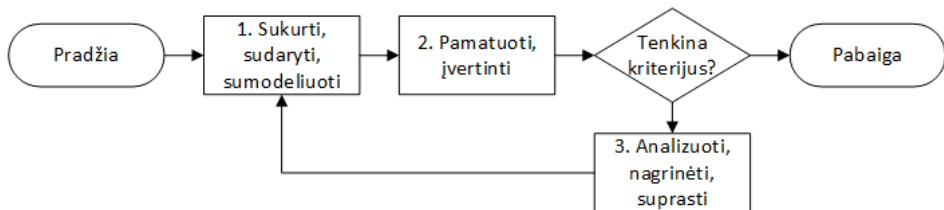
Skyriuje nagrinėjamos sistemos, teikiančios energines paslaugas pastatui ir jo naudotojams, daugeliu atveju nėra galimos be termohidrodinaminių kontūrų, pernešančių energiją. Šios sistemos, posistemiai ir komponentai yra tiriami ir nagrinėjami pasitelkiant termodinaminės ir sisteminės analizės principus. Pristatomos analizės tikslas – sukonkretinti tiriamojo objekto specifiką ir apibrėžti problematiką, susijusią su modeliavimo ir analizės metodais bei jų taikymo efektyvumu.

Darbe taikomi termodinaminės analizės metodai, pagrįsti pirmuoju (PTD) ir antruoju (ATD) termodinamikos dėsniais. Literatūros analize siekiama identifikuoti egzistuojančius metodus, jų taikymo paskirtį ir esminius trūkščius, neleidžiančius jais pasinaudoti termohidrodinaminių kontūrų analizei atlikti.

Tiriamasis objektas – pastatui energines paslaugas teikianti sistema, sudaryta iš termohidrodinaminių kontūrų, kuriais perduodama energija. Esminės šios sistemos dedamosios gali būti apibūdinamos kaip energinių paslaugų tiekimo grandinės.

Tikslinėmis charakteristikomis pagrįstas projektavimo procesas (angl. *performance based design*) gali būti apibendrinamas kaip kūrimo procesas, kurio metu yra siekiama įvertinti būsimo produkto rodiklius (CIB 1982). Išankstinis charakteristikų įvertinimas gali būti atliekamas imitaciniu modeliavimu.

Modeliavimo technologijomis koncepcinis sprendimas gali būti sukurtas ir išbandytas virtualioje erdvėje (Gogi et al. 2015, Robinson 2015). Imitacinio modeliavimo procedūrų generuotas rezultatas yra panaudojamas įvertinti būsimos sistemos rodiklius (CIBSE AM 11). Jei tikslinės charakteristikos yra tenkinamos, procesas gali būti užbaigiamas. Netenkinant nustatytų kriterijų, yra vykdomos iteracijos, kuriose atliekami keitimai atsižvelgiant į turimą informaciją apie sistemą (Lawson 1997, Hermann 2015, Müller–Roterberg 2018). Šis supaprastintas procesas, taikytinas kurti termohidrodinaminių kontūrų sistemas, gali būti apibendrintas schema, pateikiama 1.1 paveiksle.



1.1 pav. Iteracinio termohidrodinaminių kontūrų sistemos projektavimo eiga

Fig. 1.1. Iterative thermohydrodynamic loop design workflow

Imitaciniu modeliavimu galima išvengti kaštų ir laiko sąnaudų, kurios susidaro, kai sistemos yra kuriamos ir bandomos empiriniu būdu. Tačiau dėl modelių neidealumo, vidinės ir įvesties duomenų neapibrėžties, taikomų supaprastinimų – gaunamo rezultato tapatumas su realios sistemos elgsena gali skirtis plačiame intervale (Robinson 2011, Trčka 2008). Todėl svarbu priimti sprendimą, kokio detalumo turi būti sudaromas modelis.

Kompleksiškų termohidrodinaminių sistemų, teikiančių energetines paslaugas, rezultatyvumas ir funkcionalumas yra matuojamas įvairiomis metrikomis (Bejan 1996, Tsatsaronis 1999). Tai leidžia suprasti, gerai ar blogai funkcionuoja sistema. Atliekant šaltinių analizę, identifikuota, kad dominuoja termodinaminė analizė pagrįstos metrikos.

Siekiant patobulinti sistemą ar procesą, reikalinga atlikti argumentuotus keitimus, kurie yra identifikuojami analizės metodais. Tokiu būdu eliminuojant apribojimus pasiekti aukštesnį efektyvumą. (Stewart 2010, Womak et. al 1990). Esant dideliame kiekiui trukdžių ir barjerų pasiekti aukštesnį sistemos efektyvumą, svarbu koncentruotis į esmines, šaknines priežastis. (Hatamura 2006)

Svarbus šio proceso aspektas – atliekamos modeliavimo studijos rezultatyvumas ir efektyvumas (Jahangirian et al. 2011). Atliekamų veiksmų generuojama informacija turi būti naudinga ir kurti vertę sprendimo priėmėjams bei teikti analizę atliekantiems inžinieriams (Moody, Walsh 1999).

1.1. Energinų paslaugų sistemų analizės metodai

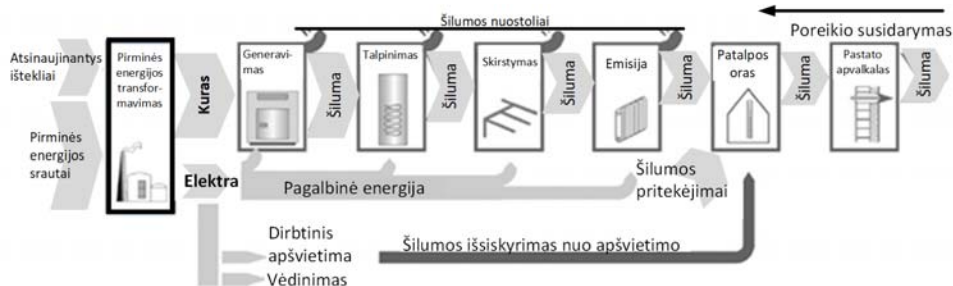
Siekiant įgyvendinti tvariosios plėtros siekiamybes (Manzi et al. 2009) Europos Sąjungos (ES) direktyvomis, o kitose šalyse analogiškais politinėmis priemonėmis, skatinami tvaraus energijos tausojo ir efektyvumo didinimo veiksmai (Jungtinės tautos 2015). Gerosios praktikos iniciatyvos, tokios kaip tarptautinės tvariosios statybos ir pastatų priežiūros schemos (BRE 2016, USGBC 2012, DGNB 2018) akcentuoja dėmesį energiniam efektyvumui ir pirminės energijos tausojimui (Korbee et al. 1979). Globaliosios politikos perspektyvos skatina energetinių sistemų plėtrą ir tobulėjimo kryptis, kurias apibrėžia strateginės ES gairės: poreikių mažinimas, generavimo efektyvumo didinimas, atsinaujinančių energijos išteklių (AEI) diegimas.

Dėl tvarumo koncepcijos, aprėpiančios socialinius, ekonominius ir aplinkosauginius aspektus, nėra vieno pirminio rodiklio, galinčio tiesiogiai išreikšti tvarumo lygį (Kharrazi et al 2013). Indikatoriai agreguojami iš pirminių kriterijų, kurie kiekybiškai arba kokybiškai išreiškia veiksmus, lemiančius atskirų gyvavimo ciklo stadijų arba viso gyvavimo ciklo poveikį aplinkai (Afgan et al. 2000; Phillis, Kouikoglou 2009). Strateginiai ES ir JT priklausančių šalių tvarios plėtros gairės: energijos vartojimas, energinės paslaugos, atsinaujinančių išteklių integravimas kartu su kitais darnaus vystymosi tikslais yra visiškai arba iš dalies vertinami tvarumo vertinimo sistemose. Termohidrodinaminių kontūrų sistemos, sudarytos iš energinių paslaugų grandinių, yra susijusios su darnaus vystymosi tikslais (Jungtinės tautos 2017) per savo funkcijas ir sukuriamą poveikį aplinkai 4 kategorijose iš 17. Energetinės pastatų paslaugos, tokios kaip patalpų šildymas, vėsinimas, vėdinimas, karšto vandens ruošimas ar kiti technologiniai procesai vartoja energiją. Energijos srautas nuo energijos gamintojo ar transformatoriaus atkeliauja energijos tiekimo grandine, kuri užtikrina sklandų reikalingos kokybės energijos srautą paslaugos teikėjui.

Pastatus aptarnaujančios inžinerinės sistemos gali būti įvardijamos kaip energetinių paslaugų tiekėjai, nes galutiniam pastato naudotojui reikalingos komfortinės sąlygos: karštas vanduo arba šiluma / vėsa technologiniam procesui vykdyti (Gudzinskas et al. 2011). Šias paslaugas teikiantys įrenginiai atlikdami savo funkciją naudoja šiluminę ir elektros energiją, kuri yra generuojama pastate arba už jo ribų. Naujausiuose EN standartuose yra apibrėžtas esminių energijos tiekimo grandinių, sujungiančių generavimą ir vartotojo poreikius, dėmenys. Energijos tiekimo grandinės, užtikrinančios komfortinę pastato patalpų temperatūrą, pavyzdys pateikiamas paveiksle (1.2 pav.).

Visi elementai energijos grandinėje yra tiesiogiai susiję vieni su kitais fiziškai per masės ir energijos pernešimo procesus. Šių veikimas dažnai priklauso vienas nuo kito. Sekant šiuo požiūriu, bendras pastato ir jo energinių sistemų optimizavimas turėtų būti atliktas išvengiant atskirų komponentų individualaus

optimizavimo. Tokiu būdu būtų išvengiama sprendimų, kurie gali turėti neigiamos įtakos kitų komponentų ir visos sistemos atžvilgiu (Torio et al. 2009).



1.2 pav. Energijos tiekimo grandinė (Shmidt 2009)

Fig. 1.2. Energy supply chain (Shmidt 2009)

Energijos tiekimo grandinė taip pat gali būti suprantama kaip sistema, perduodanti energiją iš vienos pusės (pradžios) į kitą (pabaigą). Ši sistema tipiniu atveju turi paskirtį – tenkinti galutinio vartotojo poreikius teikiant energetines paslaugas (Martinaitis, Lukoševičius 2014). Dėl šių priežasčių energijos tiekimo grandinės veikimas ir efektyvumas gali būti nagrinėjamas remiantis sisteminės analizės principais (Martinaitis 2001, Biekša 2008). Siekiant pasinaudoti šiuo metodu, turi būti išlaikomos šios prielaidos:

- sistemos paskirtis – atlikti numatytą funkciją (teikti energetinę paslaugą);
- sistema sudaryta iš posistemių;
- posistemis sudaryta iš atskirų elementų;
- posistemiai ir jų komponentai tarpusavyje sąveikauja ir yra fiziškai susieti;
- komponentų ir elementų tarpusavio sąveikia daro poveikį jų ir visos sistemos efektyvumui.

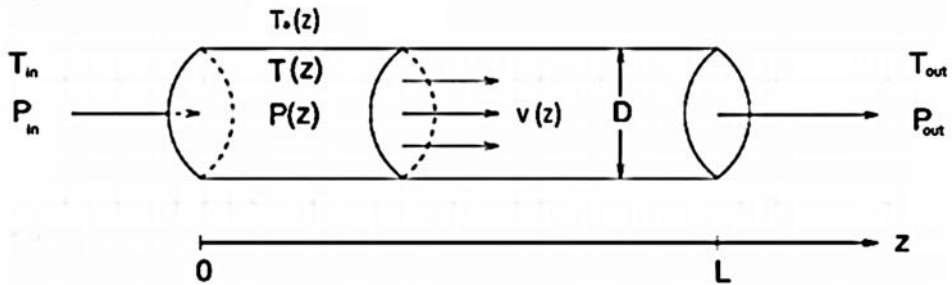
Procesai, vykstantys energijos tiekimo grandinėse, gali būti priskiriami skysčių mechanikos, šilumos mainų ir termodinamikos mokslo šakoms (Bejan 1996). Bendruoju atveju dėl stiprių tarpusavio sąsajų šie procesai negali būti vertinami kaip atskirieji – vykstantis procesų kompleksas turi būti nagrinėjamas kaip susietasis uždavinys. Šioje šilumos mainų ir skysčių mechanikos sričių sandūroje susidarantiems susietiesiems procesams nagrinėti gali būti taikomi taikomosios termodinamikos metodai.

Vykstant masės ir energijos difuzijai dėl įvairių reiškinių patiriami ne tik kiekybiniai, bet ir kokybiniai nuostoliai, kuriuos termodinamika apibrėžia kaip būsenos parametrų kitimo lygį. Energijos formų konversijos, perdavimo, kaupimo ir vartojimo grandinėse energijos kokybės lygis nuolat mažėja dėl procesų negrįžtamumo ATD atžvilgiu (Bejan 1996, Wenterdot, Herwig 2013)

Energijos pernaša sistemos komponentuose vyksta dėl fizikinių procesų:

- šilumos mainų, atsirandančių dėl temperatūros skirtumo;
- masės mainų dėl slėgio potencialo, sukuriančio srauto tėkmę.

Šiais procesais ir jų matematiniais modeliais yra apibūdinami susiję šilumos mainų ir skysčių mechanikos procesai (Vaitiekūnas 2007). Susietojo uždavinio sprendiniams gauti reikalingos kraštinės sąlygos schematiškai gali būti atvaizduojamos paveiksle (1.3 pav.) kartu su pirminiais kintamaisiais, apibūrinančiais procesų intensyvumą: T – temperatūra, P – slėgis, v – greitis. Šie parametrai kinta per kanalo ilgį (L), todėl sprendinių laukas gali būti sudaromas pagal koordinatę (z).



1.3 pav. Esminės kraštinės sąlygos ir pirminiai kintamieji (Vaitiekūnas 2007)

Fig. 1.3. Boundary conditions and primary variables (Vaitiekūnas 2007)

1.3 paveiksle, D – kanalo diametras. Indeksais žymimi parametrai: in – įtekėjime, Z – parametrai koordinatėje (z), a – apsuptyje, out – išteklėjime.

Šie procesai negali būti nagrinėjami atskirai, nes dėl fizikinės prigimties ir tarpusavio sąveikos turi būti nagrinėjami kaip susiję reiškiniai (Naterer, Camberos 2008).

Skačiuojamosios fluidų dinamikos matematinis modelis sudaromas pasitelkiant fundamentalius tvermės dėsnius (Patankar 1980). Šios lygtys balanso principu apibūdinamos:

1. Masės tvermės dėsnį (Kačeniauskas ir Česnienė 2006)

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \rho(T) u_j}{\partial x_j} = 0; \quad (1.1)$$

2. Judesio tvermės dėsnį pagal antrąjį Niutono dėsnį, niutoniniam, nespūdziam skysčiui (Kačeniauskas ir Česnienė 2006)

$$\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial p(T) u_j u_i}{\partial x_j} \right) = \rho(T) F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_e \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right); \quad (1.2)$$

čia u – greičių lauko dedamosios; p – slėgis; T – temperatūra; $\rho(T)$ – tankis priklausomas nuo temperatūros; F_i – sunkio jėga; μ_e – efektyvi klampa;

Klasikinės Navje–Stokso lygčių formuluotės (Lauder, Spalding 1974), sudarytos pasitelkiant masės ir judesio tvermės dėsnius, pakanka išreikšti slėgio ir greičio vektorių laukų sprendinius izoterminio srauto atveju. Siekiant gauti temperatūrinio lauko sprendinį (neizoterminės tėkmės atveju), reikalinga lygtis, sudaryta remiantis energijos tvermės dėsniu (Vaitiekūnas 2007). Ši lygtis, paremta PTD, apibūdina energijos pokytį ir temperatūrą kontroliniame tūryje.

3. Energijos tvermės dėsnį (pagal PTD) (Kačeniauskas ir Česnienė 2006)

$$\left(\frac{\partial \rho(T)c(T)T}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho(T)c(T)T}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{ej}(T) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = q, \quad (1.3)$$

čia $c(T)$ – savitoji šiluminė talpa, priklausoma nuo temperatūros; q – šilumos generavimas tūrio vienetė; k_{ej} – efektyvus srauto laidumas, priklausantis nuo tėkmės pobūdžio.

Termodinaminė analizė kaip šilumos mainų ir skysčių mechanikos metodus tarpusavyje integruojantis metodas gali būti panaudojamas gilinti inžinerinių sistemų supratimą (Shukuya, Hammache 2002), analizei (Sakulpipatsin et al. 2010) ir optimizavimui (Ahmadi et al. 2017).

1.1.1. Termohidrodinaminių kontūrų tyrimui naudojami metodai

Pagrindiniai sisteminio modeliavimo etapai, nepaisant egzistuojančių sistemų įvairovės, yra tie patys (Rosen ir Dincer 2001):

1. Sistemos tikslo funkcijos nustatymas, kuris nusako sistemos gebėjimą išreikšti savo savybes ir pertvarkyti darbo objektą į reikiamą būseną ar formą prie tam tikrų sąlygų, t. y. turi būti apibrėžta sistemos materialioji, energetinė ar informacinė išėiga.

2. Pagrindinių sistemos dalių (elementų) išskyrimas ir jų tarpusavio sąveikos ryšių identifikavimas. Šiame etape vykdoma pirminė sistemos struktūros analizė, ryšių krypties nustatymas, t. y. įvardijami didžiausią įtaką sistemai turintys elementai.

3. Sistemoje vykstančių procesų identifikavimas, jų įtakos sistemai bei veikimo sąlygų nustatymas. Stebimos sistemos funkcionavimo stadijos / fazės, šuoliai, būsenos kitimai, t. y. nustatoma pagrindinių pokyčių sistemoje dinamika ir veikiantys faktoriai.

4. Sistemos ir ją supančios aplinkos ryšių nustatymas, sistemos įėjimo parametrų paieška. Įvardijama, kokia forma: materijos, energijos ar informacijos srautais ryšiai įgyvendinami.

5. Neapibrėžtumų ir atsitiktinumų įtakos įvertinimas sistemos funkcionavimui, matematinis jų formalizavimas.

6. Sistemos struktūrizavimas, rangavimas sistemos tikslo funkcijos atžvilgiu, pagrindinių ryšių nustatymas. Iki šio etapo sistemos analizę gali atlikti žmogus, neturintis specifinių žinių apie atskirus sistemos elementus, tačiau tęsiant modeliavimą, būtina turėti kitų specifinių sistemos elementų žinių.

7. Sistemos valdymo mechanizmo aprašymas, kuris apima ribinių valdymo parametrų nustatymą, veikimo režimus, elementų savybių kitimo seką sistemos veikimo laikotarpiu.

Šie charakterizuoti žingsniai sutinkami metoduose, kurie nagrinėja sistemas ir jų dėmenų elgseną skirtingais laiko periodais arba skirtingomis gyvavimo ciklo stadijomis. Termodinaminės analizės metodai, integruojantys kiekybinį PTD ir kokybinį ATD aspektus gali generuoti įvairaus detalumo rezultatus, kurie gali būti agreguojami į sprendimų priėmimui reikalingą informaciją. Analizės metodai, pagrįsti ATD ir PTD, pateikiami 1.1 lentelėje. Ši lentelė iliustruoja esminius metodus naudojamus TA ir referuoja į pagrindinius darbus suformavusius šių metodikų pagrindą.

1.1 lentelė. Termodinaminės analizės metodai, pagrįsti antrąjį termodinamikos dėsnį
Table 1.1. The thermodynamic analysis methods based on second law of thermodynamics

Metodas	Bendrinis atvejų bruožas	Naudojami indikatoriai
Kontrolinį tūrį kertančių srautų termodinaminė analizė (Borel et al. 2018, Bejan 1998, Kotas 1985, Moran ir Shapiro 1998, Dincer ir Rosen 2015 bei kiti)	Analizuojamame kontroliniame tūryje vykstančio proceso efektyvumas	Įeinantis, išeinantis srautai ir sunaikintos eksergijos kiekiai
Entropijos generavimo analizė (Bejan 1996, Naterer, Camberos 2012, Sciacovelli et al. 2015)	Kontroliniame tūryje generuojamos entropijos kiekio įvertinimas	Entropijos generavimo skaičius

1.1. lentelės pabaiga

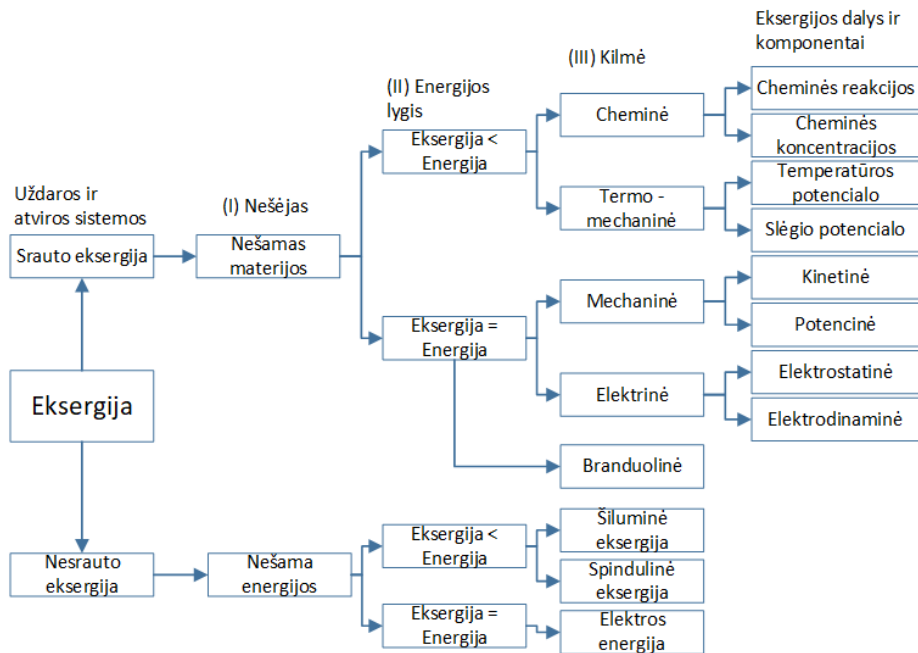
Metodas	Bendrinis atvejų bruožas	Naudojami indikatoriai
Entropijos generavimo minimalizavimo teorija (Bejan 1996, Sciacovelli et al. 2015 ir kiti)	Parametrų, užtikrinančių entropijos generavimo minimalizavimą nustatymas	Šilumos mainų ir skysčių mechanikos procesus charakterizuojantys rodikliai, naudojami tiesioginei entropijos išraiškai.
Lokalaus entropijos generavimo analizė (Bejan 1996, Herwig, Schmandt 2014 ir kiti)	Entropijos generavimo intensyvumo pasiskirstymas kontroliniame tūryje	Pirminiai kintamieji, išreiškiantys generuojamos entropijos sprendinių lauką
Išplėstinė termodinaminė analizė (Tsatsaronis ir Cziesla 1999, Tsatsaronis et al. 2006, Morozyuk ir Tsatsaronis 2013, Penkuhn, Tsatsaronis 2017, Morozyuk, Tsatsaronis 2018, Wang et al. 2019)	Sunaikintos eksergijos suskaidymas į išvengiamą / neišvengiamą ir vidinių / išorinių veiksnių lemtas dedamąsias	Sunaikintos eksergijos kiekis, išvengiamos ir neišvengiamos, vidinės ir išorinės kilmės sunaikintas eksergijos kiekis
Gyvavimo ciklo analizė kartu su termodinamine analize (Martinaitis 2001, Rocco et al. 2014 ir kiti.)	Ekserginiai gyvavimo ciklo rodikliai	Efektyvumas pagal PTD ir ATD, GCA indikatoriai

Pasirenkant analizės metodus, nėra aptarinėjama arba argumentuotai svarstoma metodo sukuriamą vertę. Daugeliu atvejų stinga pagrindimo, apibrėžiančio atliekamų veiksmų tikslumą siekiant užsibrėžtos vizijos arba strateginio tikslo. Gilesnis metodų, jų apribojimų ir sukuriamos vertės potencialo pažinimas vertingas formuojant argumentus, pagrindžiančius metodo pasirinkimą.

1.1.2. Skirtumai tarp Pirmojo ir Antrojo termodinamikos dėsnių

Remiantis šiais apibrėžimais, galima teigti, kad eksergija yra stiprus energijos kokybės indikatorius. Esminis skirtumas tarp PTD ir ATD išryškėja dėl galimybės išreikšti skirtingus energijos kokybės lygius ir termodinaminius negrįžtamumus

(entropijos gamybą), atsirandančius dėl kokybės sumažėjimo – eksergijos sunaikinimo. Sistemos eksergija gali būti suprantama kaip iš atskirų kokybinių rodiklių susidedanti energija: mechaninė, šiluminė, cheminė. Vizuali klasifikacija pateikiama (Gundersen 2011) (1.4 pav.).



1.4 pav. Eksergijos formų dekompozicija (pagal Gundersen 2011)
Fig. 1.4. Decomposition of exergy forms (according to Gundersen 2011)

Fundamentalūs skirtumai tarp PTD ir ATD išryškėja jų apibrėžimuose, kurie yra naudojami plačiausiai paplitusiuose vadovėliuose. (Moran and Shapiro 1998, Klein ir Nellis 2011, Bejan 2016, Borel ir Favrat 2018):

- Pirmasis termodinamikos dėsnis – energija negali būti sukurta arba sunaikinta, ji yra transformuojama arba pereina iš vienos formos į kitą ir visada išlieka pastovaus dydžio (kiekybinė perspektyva);
- Antrasis termodinamikos dėsnis – energijos perdavimas ir transformavimas sukuria jos kokybės degradavimą, kuris lemia energijos srautų perdavimo galimybę (mainų, pernašos procesai) (kokybinė perspektyva).

Tradiciškai ATD ištakos kildinamos iš Sadi Carnot (1796–1832) darbų. Pagrindinė šio prancūzų inžinieriaus tiriamoji veikla buvo susijusi su šiluminių variklių efektyvumo realiomis sąlygomis, koncentruojantis į maksimalaus teorinio efektyvumo apibrėžimą.

S. Carnot darbo rezultatai neleido tiesiogiai apibrėžti ATD, tačiau turėjo poveikį Lordo Kelvino (1824–1907) (Tait 1868) ir Rudolfo Clausius (1822–1888) (Clausius 1867) darbams. Šių autorių indėlis apie 1850 metus leido susiformuoti apibrėžimams ir aksiomoms, šiandieną žinomoms kaip ATD.

Iš ATD susiformavusi „energijos prieinamumo“ arba eksergijos sąvoka pirmą kartą buvo pasiūlyta chemiko Zoran Rant suformuojant šį terminą iš graikiškų žodžių EX ir ERGOS, reiškiančių „išorinį darbą“ (Rant 1963). Remdamasis Gibbs atliktais darbais (Gibbs 1876), Rant pateikė savo formuluotę, apibrėžiančią eksergijos sąvoką kaip: „didžiausias galimas (termodinaminis) darbas, kurį galima išgauti iš sistemos vedant ją iki pusiausvyros su supančia aplinka“.

Dėl eksergijos koncepto kompleksiskumo, vienareikšmiškas ir visuotinai priimtas apibrėžimas nėra pateikiamas literatūros šaltiniuose. Skirtingi autoriai pateikia savo formuluotes. Sąvokos apibrėžimo evoliucija, pateikiama 1.2 lentelė.

Termohidrodinaminių kontūrų kontekste aktualios yra termo–mechaninės eksergijos formos, susidarančios dėl temperatūros ir slėgio potencialų skirtumo. Sistemų, dalyvaujančių teikiant energines paslaugas, funkcionavimas nėra galimas be elektros energijos, reikalingos slėgtuvams – cirkuliaciniams siurbliams ir ventiliatoriams.

1.2 lentelė. Publikuoti eksergijos apibrėžimai (adaptuota pagal Kerdan 2017)

Table 1.2. Published definitions of exergy term (adapted according to Kerdan 2017)

Autorius	Eksergijos apibrėžimas
Szargut (1957)	Termodinaminio darbo kiekis, kuris gali būti išgautas iš darbinio kūno, perkeltant jį į termodinaminės pusiausvyros su aplinka sąlygas, vykdant termodinamiškai grįžtamą procesą.
Gallo ir Milanez (1990)	Termodinaminio darbo kiekis, kuris yra išgaunamas iš medžiagos kiekio, perkelta į termodinaminės pusiausvyros būseną su apsupties sąlygomis vykdant termodinamiškai grįžtamą procesą.
Dincer (2002)	Sistemos arba srauto potencialo matas, išreiškiantis galimybę sukurti pokytį.
Asada ir Boelman (2004)	Konceptas, rodantis panaudojamumą arba energijos, arba materijos kokybę. Kartu su energijos kiekybės apibrėžimu, vykstant energijos transformavimo procesams sudaro galimybę holistiškai įvertinti sistemos efektyvumą identifikuojant, kuriose vietose patiriama energijos kokybės degradacija.

1.2 lentelės pabaiga

Autorius	Eksergijos apibrėžimas
Gasparatos et. al. (2009)	Maksimalus darbo kiekis, kuris gali būti išgautas iš sistemos jai judant link termodinaminėje pusiausvyroje esančios apsupties būsenos. Apsupties sąlygomis eksergija lygi nuliui ir entropija negeneruojama.
Torio (2012)	Teoriškai maksimalus darbo kiekis, kuris gali būti išgautas iš sistemos, kur pasinaudojant eksergija yra matuojamas energijos srauto potencialas, transformuotinas į aukštos kokybės energiją.
Muller et al. (2011)	Energijos nešėjo gebėjimas atlikti darbą, kuris gali būti suprantamas kaip kokybės indikacija arba mato vienetas.

1.1.3. Termodinaminės analizės nauda

Pasinaudojant termodinaminės analizės metodais, galimas efektyvesnių inžinerinių sistemų, teikiančių energetines paslaugas planavimas ir projektavimas. Siekiant objektyviai įvertinti procesus, vykstančius kombinuotose sistemose, tikslinga šiuos vertinti atliekant dinaminį modeliavimą.

Reikalinga integruoti termodinaminės analizės metodus į imitacinio modeliavimo programas. Analizuojant kiekvienu laiko žingsniu apskaičiuotas vertes, atsiranda galimybė identifikuoti kritinius sistemų funkcionavimo periodus ir pasirinkti projektinius parametrus bei sistemos valdymo algoritmus, užtikrinančius minimalų sistemos negrįžtamumo laipsnį.

Srauto tėkmės ir šilumos mainų procesai, vykstantys realybėje, visais atvejais patiria nuostolius. Šie nuostoliai fluido tėkmės atveju dažniausiai išreiškiami slėgio pokyčiu tėkmei vykstant uždame kanale arba trinties jėgomis aptekant kūnus. Šilumos mainų atveju – esant pastoviam šilumos perdavimo intensyvumui, nuostoliai charakterizuojami kaip netenkamas energijos kiekis ir temperatūros pokytis.

Bendruoju atveju, visi šie netenkamos energijos kiekiai gali būti įvardyti kaip eksergijos nuostoliai. Negrįžtamumo laipsnio didėjimas vykstant procesui arba entropijos generavimas sudaro būtinybę numatyti papildomą energijos tiekimą siekiant užtikrinti tolesnį proceso ar įrenginio funkcionavimą. Esminiai termodinaminės analizės, aprėpiančios PTD ir ATD, privalumai:

- šilumos mainų kokybės įvertinimas: PTD įvertina energijos kiekį, perduotą šilumos mainų įrenginyje. ATD gali būti įvertintas termodinaminio darbo kiekis, reikalingas proceso vykdymui ir perduodamos energijos kokybinis nuvertėjimas (Herwig ir Wenterodt 2013, Redecker ir Herwig 2012 Herwig ir Kock 2005, Herwig ir Schmand 2013 ir kiti.);

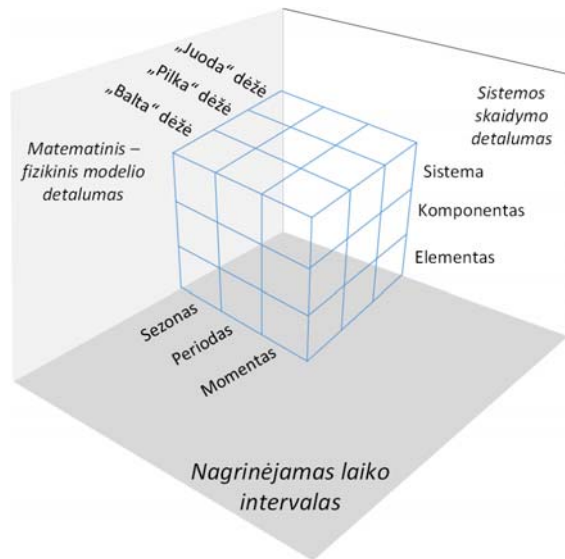
- skirtingų energijos formų srautai, sutinkami procesuose, gali būti įvertinami kiekybiniu ir kokybiniu požiūriais. Skirtingų energijos formų perskaičiavimas į eksergiją sudaro galimybę palyginti pagal lygiavertčius rodiklius. Energijos kokybės nuvertėjimas (entropija) arba eksergijos nuostoliai taip pat padeda bendrai charakterizuoti skirtingų energijos rūšių srautų kokybės netektį (Bejan 1996, Shapiro ir Moran 2010, Nellis ir Klein 2011 ir kiti.). Atsižvelgiant į skirtingų termodinaminių srautų kiekybinę ir kokybinę išraiškas, galima apibūdinti realias proceso vykdymo sąnaudas. Toks vertinimas palankus formuojant optimizavimo užduotį siekiant mažiausių energijos sąnaudų kokybiniu atžvilgiu (Herwig ir Wenterodt 2013, Misevičiūtė et. al 2017, Misevičiūtė et. al 2018);
- informacijos apie procesų negrįžtamumo kilmę suteikimas: identifikuota susidarančių nuostolių priežastis gali būti eliminuota arba sumažinta iki priimtinos ribos. Negrįžtamumų šaltinio įtakos įvertinimas bendram komponento ar sistemos efektyvumui suteikia galimybę nustatyti sistemos tobulinimo prioritetus (Herwig ir Kock 2007, Bejan 1996, Naterer ir Camberos 2003, Bejan 1996, Bejan et.al. 2000, Sciubba 2012, Badescu 2007 ir kiti).
- sistemos komponentų tarpusavio sąveikos kokybinis įvertinimas: pasitelkiant išplėstinės termodinaminės analizės metodus atsiranda galimybė įvardyti komponentų tarpusavio sąveiką ir prognozuoti visos sistemos efektyvumo pokytį keičiant atskirus komponentus (Tsatsaronis 2001; Kelly et al. 2009; Wang et al. 2012; Morosuk et al. 2012 ir kiti).
- termodinaminis efektyvumas tiesiogiai atspindi sistemos tvarumo lygį (Dincer ir Rosen 2001; Stougie ir van der Kooi 2011; Wall ir Banhatti 2011 ir kiti.) Pasitelkiant termodinamine analize pagrįstus metodus, atsiranda sistemos efektyvumo didinimo galimybės gyvavimo ciklo požiūriu sumažinant skirtingų energijos formų ir pirminių žaliavų sąnaudas valdyti procesą ir sukurti sistemą (Tsatsaronis 2001, Scubia ir Wall 2007).

Apibendrinant šiuos aspektus, galima teigti, kad siekiant padidinti sistemų šilumos mainų efektyvumą, kokybės ir fluido tėkmės patiriamų nuostolių atžvilgiu tikslingas termodinamine analize pagrįstų metodų taikymas. Naudojami energijos vartojimo efektyvumo didinimo vertinimo metodai, paremti vien PTD nuostatomis, nėra pakankami. Siekiant užtikrinti darnų energetikos procesą, būtina taikyti metodus, įvertinančius energijos kokybės parametrus.

1.2. Modeliavimo detalumo dimensijos

Atliekant literatūros analizę, išryškėja, kad tyrėjai taiko skirtingo detalumo modelius sistemoms ir jų elgsenai tirti. Pagrindiniai aspektai, kuriuos galima

išskirti, yra sistemos skaidymo detalumas, fizikinis–matematinis apibrėžimas ir vertinimo laikotarpis. Pagal šias dimensijas galima klasifikuoti naudojamus sistemų modelius. Apibendrintai ši klasifikacija gali būti suprantama kaip esminių aspektų (dimensijų) tarpusavio sandūra (1.5 pav.).



1.5 pav. Analizės modelių klasifikacija pagal svarbiausias dimensijas

Fig. 1.5. Classification of analysis models according to most important dimensions

Modelio matematinis–fizikinis detalumas, gali būti klasifikuojamas pagal fizikinių reiškinių sąsają su matematinėmis išraiškomis ir kitimo priklausomybėmis pasinaudojant „baltos“ – „juodos“ dėžės apibrėžimais. Nuo šio aspekto priklauso modelio sudarymo bei modeliavimo trukmė ir tikslumas lyginant su realiais fizikiniais reiškiniais.

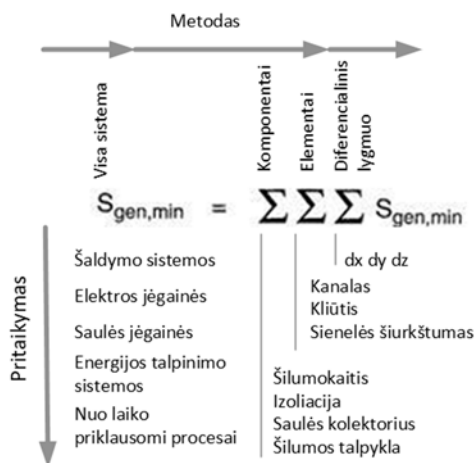
Sistemos skaidymo detalumas įgauna svarbą dėl sistemos hierarchijos ir tarpusavio sąsajų tarp posistemų, komponentų ir elemento atskleidimo ir geresnio supratimo. Detaliau šis aspektas aprašomas 1.2.1 poskyryje.

Nagrinėjamas laiko intervalas gali kisti priklausomai nuo analizės poreikių, tačiau duomenų agregavimas į stambius intervalus neleidžia išvelgti sistemoje vykstančių dinaminių procesų, objektyviai jų įvertinti modeliavimo būdu. Tačiau didelis duomenų kiekis taip pat gali sukurti „informacijos perkrovis“ (angl. *information overload*) efektą.

1.2.1. Sistemos dekompozicija

Techninės sistemos neegzistuoja pačios savaime. Realybėje kiekviena sistema B yra aukštesnės sistemos A – viršsistemės – dalis. Kaip aukštesnės sistemos dalis sistema B sąveikauja su kitais viršsistemės elementais. Sistemos lygmuo hierarchinėje struktūroje yra apibūdinamas nurodant jos rangą (Biekša 2007, cituoja Martinaitis 2000, Martinaitis 2001). Analogiška dekompozicija yra sutinkama „9 ekranų“ klasifikacijoje, naudojamoje „TRIZ“ metodikoje (Altschuller 1968) ir kituose sisteminės analizės metoduose.

Energetinėse sistemose, kuriose vyksta skysčių mechanikos ir šilumos mainų procesai, eksergijos nuostolių atsiradimas arba entropijos generavimo procesai gali būti nagrinėjami skirtingu detalumu sistemos arba komponentų lygmeniu atžvilgiu. Bejan (Bejan 1996) pateikia klasifikaciją (1.6 pav.), apibendrinančią entropijos generavimo minimalizavimo metodą kaip sudėtinės sistemos sukuriama entropijos produkto, sudaryto iš atskirų komponentų, elementų ir diferencialiniame lygmenyje sukuriamų entropijos kiekių.



1.6.pav. Termodinaminio optimizavimo klasifikacija sistemos ir komponentų atžvilgiu (Bejan 1996)

Fig. 1.6. The classification of thermodynamic optimization from perspective from system to component (Bejan 1996)

Sistemos gali būti dalijamos atskirais komponentais darant prielaidą, kad šie sudaryti iš pasikartojančių segmentų, kurių geometrinė forma ir aplink juos vykstantys reiškiniai gali būti apibūdinami fundamentaliais skysčių mechanikos ir šilumos sklaidimo matematiniais modeliais – diferencialinėmis lygtimis, naudojančiomis masės tvermės dėsnius. Skysčių tėkmės ir šilumos sklaidimo

procesų apibūdinimui naudojant panašumo teoriją ir išvestinius dydžius, atsiranda galimybė eksperimentiniu būdu šiuos procesus nagrinėti komponentų lygmenyje.

Priklausomai nuo modelio kompleksiskumo, gaunamo rezultato nuokrypis nuo „tikrojo“ rezultato santykinai mažėja, tačiau augant įvesties duomenų kiekiui, auga rezultato neapibrėžtumas dėl įvedamų parametrų įnešamos paklaidos, susijusios su medžiagų savybėmis, geometrija (Macdonald 2002). Siekiant patikimai prognozuoti modeliuojamų procesų parametrus ir gauti artimesnius realybei sprendinius, daugeliu atveju siekiama sumažinti prielaidų ir supaprastinimų kiekį. Tačiau kaip apibrėžia tie kurie tyrėjai (Hopfe 2009, Trčka 2008) modelio detalumas turėtų būti didinamas iki racionalios ribos atsižvelgiant į įvesties duomenų kokybę.

Entropijos generavimas, kaip reiškinys, neigiamai veikia sistemos efektyvumą ir naudingumą. Visos sistemos, sistemų, komponentų, elementų ar diferencialiniame lygmenyje susidarantys termodinaminiai negrįžtamumai yra pirminių kintamųjų, lemiančių energijos kokybės degradavimą, sukuriamas rezultatas.

Nagrinėjamos sistemos gali būti nagrinėjamos kaip vientisas ir nedalomas darinys arba skaidomos į įvairaus detalumo dedamąsias. Sistemos dekompozicijos lygis tiesiogiai daro poveikį sudaromų skaičiuojamųjų modelių fizikiniam detalumui ir reikalingų prielaidų kiekiui.

1.2.2. Modelio kompleksiskumas

Sistemų, kuriose vyksta energijos generavimo ir energijos srautų perdavimo, balansavimo, akumuliacinio procesai, planavimas ir projektavimas dažnu atveju grindžiamas imitacinio modeliavimo technologija (Gogi et al. 2015). Sudarius sistemų alternatyvų modelius, jų generuojami rezultatai gali būti lyginami tarpusavyje (Herrmann 2015), atliekamas sistemos optimizavimas koreguojant pradinius parametrus arba atliekant kitus veiksmus, sukuriančius vertingą informaciją (Howard 1966).

Sistemos ar jos komponento elgsenos apibūdinimas – modelis arba matematinė formuluotė gali būti klasifikuojama pagal abstrakcijos lygį ir daromų prielaidų kiekį, kuris yra priimtinas siekiant numatomo rezultato (Robinson 2011, Robinson 2015). Per didelio supaprastinimo atveju, modelis netenka būdingų charakteristikų, kai aukštas detalumo lygmuo gali generuoti perteklinės informacijos kiekį ir sukurti didelį skaičiuojamųjų sąnaudų poreikį, kuris gali būti neadekvatus sprendžiamam uždaviniui (Reddy 2010). Priklausomai nuo fizikinių procesų atspindėjimo lygmens, imitaciniame modeliavime naudojami modeliai gali būti klasifikuojami pagal skirstymą, pateikiamą 1.3 lentelėje.

1.3 lentelė. Modelio fizikinio detalumo atvejai (Reddy 2010)**Table 1.3.** The cases of the model physical complexity (Reddy 2010)

Modelio apibūdinimas	„Baltos dėžės“ Aukšto detalumo	„Pilkos dėžės“ Pusiaus empirinis	„Juodos dėžės“ Empirinis
Kraštinių sąlygų kitimas laiko atžvilgiu	Dinaminis arba kvazi–stacionarus	Kvazi–stacionarus arba stacionarus	Stacionarus
Fizikinis detalumas	Aukštas	Vidutinis	Minimalus
Lygčių tipas	Diferencialinės lygtys (ODE), Dalinės diferencialinės lygtys (PDE)	Diferencialinės lygtys, Algebrinės lygtys	Algebrinės lygtys

Modelio lygmens pasirinkimas priklauso nuo siekiamo rezultato ir nustatomų prioritetų rezultato kokybei bei kiekybinei išraiškai. Siekiant padidinti rezultato kokybės lygį, racionalu atsižvelgti į papildomas skaičiuojamąsias sąnaudas ir modelio neapibrėžtumo prieaugį įvertinant gaunamą naudą ir rezultato nuokrypį nuo realaus fizikinio proceso (Trčka 2008, Trčka ir Jansen 2010).

Siekiant objektyviai įvertinti modeliuojamą procesą ir užtikrinti mažiausią priimtina modelio ir realios sistemos nesutapimą (Oberkampf, Trucano 2002) – reikalinga palyginti skirtingo detalumo komponentų modelius ir įvardyti, koks detalumas yra reikalingas modeliavimo tikslams įgyvendinti (CIBSE AM 11).

Modelio gaunamo rezultato tikslumas ir neapibrėžtumas priklauso nuo pasirinkto sprendimo metodo ir fizikinio detalumo lygio bei dimensijų. Kadangi termodinaminės analizės pagrindu susiformavę metodai naudoja šilumos mainų ir skysčių mechanikos procesus vertinančių matematinių modelių gaunamus rezultatus, analizės objektyvumas tiesiogiai susijęs su pasirinktu modelio detalumu (Wenterdot, Herwig 2013).

Nagrinėjamo sistemos kontrolinio tūrio elementų ir vykstančių fizikinių procesų kompleksiskumas daro tiesioginį poveikį modeliavimo metodo pasirinkimui (Barkauskas et al. 2004). Priklausomai nuo poreikio atspindėti sprendinius modeliuojamo fizinio komponento geometrijoje, komponentai gali būti klasifikuojami pagal geometrinių supaprastinimo laipsnį, kuris iliustruojamas 1.4 lentelėje. Lentelė sudaryta apibendrinus dinaminio modeliavimo priemonių TRNSYS (Klein, Nellis 2015) ir COMSOL (Pryor 2009) naudojamas modelių geometrines reprezentacijas.

1.4 lentelė. Modelio dimensių ir detalumo sąsajų matrica

Table 1.4. The relation matrix between dimension of model and level of detailness

	„Juoda dėžė“	„Pilka dėžė“	„Balta dėžė“	Geometrinė reprezentacija pagal dimensiją
0D				Taške gaunamas sprendinys (angl. <i>Lumped models</i>).
1D				Tiesėje (Kreivėje) išdėstytų taškų sprendiniai (gradientas).
2D				Sprendinių laukas plokštumoje (2D).
3D				Sprendiniai, išdėstyti tūrinėje (3D) erdvėje.

Priklausomai nuo pasirinkto geometrinio supaprastinimo laipsnio gali būti taikomi skirtingo fizikinio detalumo modeliavimo metodai, kurie yra klasifikuojami pagal matematinėse išraiškose identifikuojamus pirminius kintamuosius ir jų priklausomybes išreiškiančias išraiškas.

Atsižvelgiant į informaciją, kurią siekiama gauti atliekant analizę, turi būti pasirenkamas fizikinis modelio detalumas. Tai svarbu dėl modelio tikslumo ir minimalių modelio sukūrimui ir imitaciniam modeliavimui atlikti reikalingų skaičiuojamųjų ir laiko sąnaudų kiekio.

1.2.3. Laiko periodai, naudojami modeliavimo metuose

Priklausomai nuo užduoties, kurią siekiama išspręsti, pasirenkamas laiko periodas, per kurį nagrinėjamas procesas ir sistemos ar komponento elgsena. Tipiniu atveju, priklausomai nuo kraštinių sąlygų pastovumo, galimi supaprastinimai, sumažinantys skaičiuojamųjų žingsnių skaičių tam pačiam periodui. Inžinerinėje ir tiriamojoje praktikoje dažniausiai sutinkami atvejai (Reddy 2010):

Pastovios momentinės sąlygos – projektinės sąlygos, reprezentuojančios didžiausias apkrovas ir nepalankiausias sąlygas, kai kraštinių sąlygų kitimo laike raida yra nesvarbi arba gali būti nevertinama. (Klein, Nellis 2011)

Tipinis periodas – projektinės sąlygos, reprezentuojančios kritinį periodą, kai kraštinių sąlygų raida per laiką turi poveikį rezultatui ir šio kitimo supaprastinimas nėra galimas. Inžinerinėje praktikoje taikomas nustatyti sistemos dydį (ASHRAE 2009; Thomas et. al 2017).

Sezonas – tipinis sistemos funkcionavimo periodas, per kurį siekiama įvertinti sistemai būdingą elgseną įvairiomis sąlygomis.

Metai arba ilgesnis laikotarpis – laikotarpis, aprėpiantis keletą skirtingų funkcionavimo periodų arba gyvavimo ciklo periodą.

Pastatų mikroklimato sistemas aptarnaujančios energinių paslaugų tiekimo grandinės daugeliu atvejų nagrinėjamos sezono arba metų periodais dėl kintančių kraštinių sąlygų ir galimų jų kombinacijų (Martinaitis 2001), kurios gali turėti skirtingą poveikį tiksliniams rodikliams, efektyvumui ir energijos sąnaudoms, emisijų dydžiui.

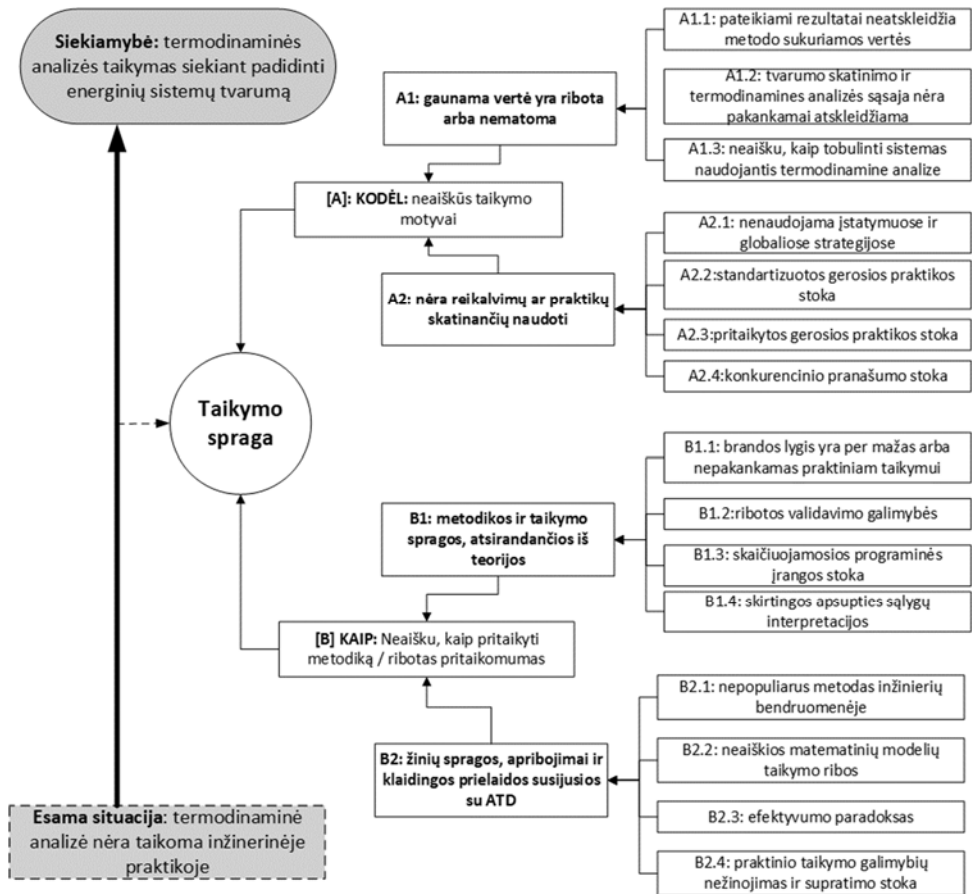
1.3. Termodinaminės analizės metodų taikymas

Termodinamine analize pagrįstais metodais atliekamas didelis kiekis analizių, ir publikuojamų darbų skaičius nuolat auga. Tačiau, nors metodai įvardijami kaip tikslingi, informatyvūs (Dincer ir Rosen 2001, Hepbasli 2012, Shmidt 2009 ir kiti) ir galintys pakreipti tvariąją plėtrą gera kryptimi (Dincer ir Rosen 2013), tačiau jų taikymas inžinerinėje praktikoje nėra dažnas (Herwig 2010) ir stokojama dokumentuotų taikymo pavyzdžių.

Toliau šiame poskyryje pateikiama taikymo spragos struktūra, aprėpianti techninius, metodinius ir iš dalies psichologinius aspektus. Pateiktoje dekompozicijoje (1.7 pav.) susiejama esama standartizuota ir geroji praktika, teisinė bazė, vertės pateikimo metodikos ir programinės įrangos galimybės.

Šiame kontekste aspektai, lemiantys spragos susidarymą yra matomi kaip trukdžiai, lemiantys pasipriešinimą situacijos pasikeitimui. Todėl atliekama analize siekiama identifikuoti, klasifikuoti ir atkreipti dėmesį į aspektus, lemiančius esamą situaciją ir pokyčius, reikalingus situacijai gerinti.

Sudaryta problemos klasifikacija nėra baigtinė ir gali būti išplėsta įtraukiant socialinius ir ekonominius aspektus. Pateikta analizė apibendrina didžiąją dalį esminių priežasčių, lemiančių atotrūkį ir barjerus, stabdančius ATD pagrįstų metodų ir technologijų progresą ir adaptavimą inžinerinėje praktikoje. Dėl disertacijos apimčių apribojimo pateikiama tik dalis šios analizės punktų, kurie labiausiai siejasi su disertacijoje nagrinėjama tematika.



1.7 pav. Taikymo spragos dekompozicija
Fig. 1.7. Decomposition of application gap

1.3.1. Taikymo tikslų ir motyvų analizė

Technologijų, metodų ir priemonių sklaidai bei praktikos taikymui svarbus aspektas yra praktikų motyvacijos kilmė. Aiškiai apibrėžta ir įvardyta kuriamo metodo / produkto vertė padeda lengviau pasirinkti būtiniausią priemonę tikslui pasiekti. Toliau analizėje detalizuojami motyvai, susiję su metodo taikymo paskirtimi ir funkcija.

Sąvoka „vertė“ dažnai vartojama vadybinėse praktikose ir mokslinėje bendruomenėje. Gaunamų veiksmų, strategijos rezultatų ar produktų vertė yra kuriama, kad išspręstų problemas arba padidintų naudą konkrečiose situacijose (Osterwalder, Pigneur 2013). Vertės pateikimo formuluotės taikymas padeda

sumažinti riziką dėl nežinomos arba nematomos vertės atsiradimo. (Bocken et.al 2015). Pagal mokslininkus (Osterwalder, Pigneur 2013) vertė yra sukuriamą, kai pateikiama funkcija yra reikalinga vartotojui tam, kad būtų pašalinami trukdžiai ir / arba sukuriamos naudos vartotojo atliekamuose darbuose.

Vertės analizės (VA) metodo funkcija ir generuojama informacija turi būti kaip įrankis arba informacijos generavimo priemonė konkrečiai problemai spręsti arba naudingumui didinti (EN12973). Skirtingas roles atliekantiems analizės arba jos rezultatų naudotojams svarbūs skirtingi taikymo aspektai (Torio, Schmidt 2011) skirtingiems vaidmenims (įstatymų leidėjams, mokslininkams, konsultantams, inžinieriams ir atsakingiems vartotojams) dėl skirtingų atliekamų darbų ir funkcijų, dėl skirtingų naudų ir žalų šaltinių.

Paradoksalu, kad tie patys veiksmai, kurie teikia pridėtinę vertę vienai rolei arba neapibrėžtam vaidmeniui, kitoms rolėms gali būti įvardijami kaip nevertingi. Tai lemia:

- poreikio nebuvimas – problemos sprendimo metodas nėra svarbus arba netgi reikalingas. Priverstinis jo naudojimas gali sunaikinti vertę (Bocken et al. 2015);
- ribotas supratimas – supratimo stoka apie tai, kaip ketinama išspręsti problemą, vertė lieka neatskleista (Bocken et al. 2015);
- stipresnės konkuruojančios alternatyvos – be konkurencinių pranašumų metodas nėra tinkamas, nes nesilūdo naujos arba papildomos naudos. Tai yra tik alternatyvi priemonė efektyviau pasiekti tuos pačius rezultatus (Herrmann 2015).

Labai svarbu veiksmingai pristatyti siūlomą vertę, kad ji būtų pripažinta, užfiksuota ir tinkamai atskleista. Todėl vertė turėtų būti pateikta suprantamai, be nuomonės ar argumentais pagrįstų prielaidų (Weiss, Newman 2011). Geresniam sukuriamos vertės supratimui ir pateikimui tikslinga naudoti vizualinį (Jones 2010; Jones, Ledinger 2010) pateikimą siekiant labiau suprasti rezultatus ir pasirinkti objektyvias metrikas (Croll, Yoskovitz 2013).

Didžiausią citavimo indeksą turinčiuose žurnaluose („*Energy and Buildings*“, „*Sustainable energy reviews*“, „*Built Environment*“ ir kiti), publikuojančiuose tyrimų medžiagą tvariosios plėtros ir pastatų energetinių sistemų tematika aptiktos publikacijos gali būti suskaidytos į: (1) publikuojančias TA metodų pagrindus gautus rezultatus ir (2) cituojančias kitų autorių, naudojančių TA metodus, publikacijas. Šios gali būti sugrupuotos pagal ATD analizės rezultatų pateikimo ir pristatymo tipą, pateikiamą 1.5 lentelėje.

1.5 lentelė. Publikacijų suskaidymas pagal išskiriamus antrojo termodinamikos dėsnio aspektus

Table 1.5. Sorting of publications according to aspects of second law of thermodynamics

Aspektas	Publikacijų kiekis
ATD ir PTD metodai iliustruoja kitus metodus arba siūlo alternatyvias metrikas	31 %
Konstatuoja, kad šis metodas leidžia rasti būdų pagerinti našumą	20 %
Įvardija gaunamo našumo parametrus	13 %
Tiesiog deklaruoja metodo panaudojimą be rezultatų iliustracijos	13 %
Sisteminės analizės naudojimas kaip komponento tyrimo metodas	7 %
Naudojamas optimizavimo funkcijai išreikšti	3 %
Minimas kaip alternatyvų palyginimo metodas	2 %

Pastaba: Kiti atvejai sudaro 11 % nagrinėtų publikacijų. Publikacijų (61), kurios nurodytos šioje lentelėje, sąrašas pateikiama A priede.

Apžvelgiamuose straipsniuose, akcentuojančiuose metodo naudas ir privalumus, galima išskirti dažniausiai pasikartojančius aspektus (plačiau 1.2.1. Termodinaminės analizės nauda). Pateikiami argumentai pasižymi aukštu abstrakcijos lygiu, todėl yra sudėtinga gauti praktinę naudą, kai siekiama padidinti sistemų efektyvumą. Dėl šios priežasties metodo privalumai lieka neįvertinti kitų autorių ir perduodama informacija neperteikia metodo funkcionalumo.

1.3.2. Termodinaminės analizės taikymo apribojimai

Metodų taikymo prieinamumas gali būti apibrėžtas pagal tai, kaip nuosekliai detalizuotas ir dokumentuotas yra naudojimo procesas. Aiškus apribojimų apibrėžimas ir metodo vykdymo procedūrų skaidrumas lemia supratimą apie taikymo galimybes. Šiame skyriuje aprašoma, su kokiomis kliūtimis susiduriama tiesiogiai taikant ATD pagrįstus metodus.

Galima teigti, kad metodikos brandos lygis gali riboti šios taikymą (Mettler 2011). Brandos lygio įvertinimas (Mettler 2011) yra plačiai taikomas metodas procesų, standartų arba vadybos sistemų vertinimui, programinės įrangos plėtojimui. Pasinaudojant technologijos brandos nustatymo metodika, gali būti analizuojamas termodinaminės analizės metodų nuoseklumas, išbaigtumas ir integralumas. Tokiu būdu literatūros analize yra identifikuojami brandos lygmenį indikuojantys bruožai ir įvardijami aspektai, trukdantys termodinaminės analizės metodų visumai pasiekti aukštesnį brandos lygmenį. Brandos lygį indikuojantys

faktai (šaltiniai) ir spragos bei nuoseklumo stoką nurodantys aspektai pateikiami 1.6 lentelėje.

Gana keista, kad metodinė bazė, perduodama universitetuose kaip kertinis daugelio inžinerinių disciplinų pagrindas, yra laikoma sudėtinga ir vengiama ją taikyti dėl kompleksiško ir naudojimo sudėtingumo (Dincer ir Rosen 2013).

Daug autorių (Jansen 2013, Dincer ir Rosen 2013, Herwig 2010 ir kt.) įvardija privalumus ir PTD, ir ATD pagrįstų metodų taikymo ir praktinio naudojimo vertę. Siekiant šia verte pasinaudoti ir ją maksimizuoti, tikslinga vykdyti suprantamą ir nuoseklų procesą arba apibrėžtą metodų taikymo eigą, susidedančią iš etapų, kurių baigtumas ir generuojamas rezultatas būtų aiškiai apibrėžtas ir kiekybiškai pamatuojamas.

1.6 lentelė. Metodikų brandos lygio klasifikacija

Table 1.6. Maturity level of the methods

	Apibrėžimas	Pasiekta	Spragos ir nuoseklumo stoka
Pradinis (angl. <i>Ad-hoc</i>)	Veikla, charakterizuojama kaip neorganizuota, kartais chaotiška. Sėkmė priklauso nuo individualių pastangų.	1. Platus spektras atliktų atvejo analizių indikuoja skirtingus būdus taikyti PTD + ATD analizę (Hepbasli 2012, Torio et. al 2009, Scalioveli et. al. 2015). 2. Didelis kiekis tyrimų nurodo galimybes plėtoti ir taikyti metodus (žr. 1.3.1. Taikymo tikslų ir motyvų analizę)	1. Taikymo apimtys nėra visiškai suprantamos ir alternatyvūs metodai gali likti nepastebėti. 2. Rezultatų pritaikomumas ne visais atvejais skaidriai pristatomas ir aptariamas. 3. Prielaidos ir atliekamų veiksmų specifika lieka neatskleista arba nėra tinkamai cituojama.
Pakartojimas	Procesas yra iš dalies dokumentuotas. Paliekama pakartojimo galimybė atkartojant tuos pačius nurodytus žingsnius.	1. Žinynai ir mokymo medžiaga suteikia agreguotas žinias ir formuoja bendrojo pobūdžio gaires taikyti metodus (Moran ir Shapiro 1998, Klein ir Nellis 2011, Bejan 2016)	1. Nuosekliai suformuotos, detalios gairės su įvardytais apribojimais išlieka nesuformuotos arba neatskleistos. 2. Pritaikius skirtingas metodikas, to paties atvejo rezultatai skiriasi. 3. Vystoma diskusija dėl prielaidų, susijusių su krašutinėmis sąlygomis.

1.6 lentelės pabaiga

	Apibrėžimas	Pasiekta	Spragos ir nuoseklumo stoka
Apibrėžtas /Integuotas	Dokumentuota, standartizuota ir integruota į standartinius programinės įrangos paketus. Procesinė eiga naudojasi patikrinta ir pritaikyta metodikos versija	1. Pasiūlyti standartizuoti žymėjimai siekiant padidinti supratimą (Tsatsaronis). 2. Tyrimų įstaigose naudojamas „namų“ programinis kodas ir integracija į įrankius (Baldi ir Leonici 2015, Zmeureanu ir Xin 2014)	1. Plačiai prieinamos programinės įrangos stoka. 2. Skirtingų metodų taikymo privalumai yra nežinomi arba neaiškūs. 3. Nėra žinoma, kada yra tikslinga pritaikyti PTD+ATD pagrįstus metodus.
Suvaldytas	Procesas ir generuojamas rezultatas yra kokybiškai suprantamas ir kontroliuojamas.	–	1. Vykdomo eigos arba proceso žingsniai yra neaiškūs arba neapibrėžti. 2. Nėra aišku arba pakankamai apibrėžta metodų taikymo ir generuojamos informacijos sukuriama vertė.
Efektyvus	Užtikrintas nuolatinis tobulinimas. Proceso vadyba aprėpia sąmoningą proceso optimizavimą ir tobulinimą.	–	1. Nėra inžinerinėje praktikoje paplitusių proceso efektyvumo metrikų, leidžiančių kiekybiškai išreikšti optimizavimo ir tobulinimo progresą. 2. Mažai pastangų yra skiriama tobulinti metodo plėtojimą, koncentruojantis į naujų atvejų analizes.

Didelis kiekis naujų publikacijų, kuriose nagrinėjami atskiri atvejai, leidžia teigti, kad daugelis tyrėjų koncentruojasi į taikymo galimybes naujiems atvejams ir stokojama fundamentalių metodo plėtojimo pavyzdžių (Herwig 2010). Tik nedidelė dalis tyrėjų pristato studijas, plėtojančias teorinius pagrindus ir metodų taikymo galimybes ir didinančius supratimą apie slypinčias spragas (Sakulpipatsin 2012).

Neskiriant pakankamai dėmesio, nutylint arba paslepiant metodų apribojimus, nukrypimus ir klaidingus taikymo atvejus, gali susidaryti sklандаus, brandaus metodo ir supratimo iliuzija (Rozenblit ir Keil 2002). Tokia situacija iškreipia vykdomų tyrimų prioritetus ir gali inspiruoti svarbių aspektų ignoravimą.

Kompiuterinė termodinaminė analizė (pagrįsta PTD ir ATD principais) nėra plačiai paplitusi dėl mažo viešai prieinamų priemonių ir esamų programinės įrangos integracijos galimybių (Torio 2008, Zoder et al. 2018). Egzistuojantys pavyzdžiai, naudojant integravimą ir modeliavimo bei skaičiavimo įrankių išplėtimą, gali būti klasifikuojami pagal analizės atlikimą (vidiniai ir išoriniai įrankiai), duomenų apdorojimo procedūrų automatizavimą ir apdorojimo momentą (žr. 1.7 lentelė).

1.7 lentelė. Programinės įrangos ir antrojo termodinamikos dėsnio metodų integracija
Table 1.7. Integration of software tools and second law of thermodynamics methods

Analizės atlikimas	Duomenų perdavimo procedūra	Apdorojimo momentas	Studijų pavyzdžiai
Vidinės įrankio galimybės	Automatizuotas	Lygiagrečiai	Torio 2012; Gourmelon et al. 2015
		Po imitacinio modeliavimo procedūros	Sakulpipatsin 2008; Jansen 2013; Terés–Zubiaga et al.2013; Terlizzese 2010
Išoriniai įrankiai	Rankinis	Po imitacinio modeliavimo procedūros	Baldi and Leonici 2015
	Automatizuotas	Lygiagrečiai	Peng Fu et al. 2016
		Po imitacinio modeliavimo procedūros	Bielskus et al. 2015

Visais išvardytais atvejais autoriai neatskleidžia ir viešai nesidalija vykdymo failais ir programiniu kodu. Todėl programinio kodo turinys ir pavyzdžiai išlieka viešai neprieinami kitiems termodinaminę analizę praktikuojantiems asmenims.

Galima rasti industrinių procesų modeliavimo įrankius, tokius kaip *ProSimPlus* (*Prosimlius* 2018), *AspenPlus* (*AspenPlus* 2018), *Cycle Tempo* (*Cycle Tempo* 2018), kurių taikymo pavyzdžių termodinaminei analizei atlikti nėra gausu mokslinėse publikacijose. Šie įrankiai integruoja PTD ir ATD funkcionalumą, (eksergijos srautų apskaičiavimui), tačiau jie yra orientuoti į pramoninius procesus, todėl jų taikomumas tvariuose pastatuose vykstančių procesų modeliavimui yra ribotas.

Paprastai turimų įrankių ar funkcijų stoka daro įtaką modeliavimo įrankių ir skaičiavimo aplinkų susiejimui, pavyzdžiui, *MS excel*, *MathWorks Matlab*, *Modelica* ir panašių matematinių procedūrų atlikimo ir modeliavimo įrankių.

Esant tokioms integracijoms, atsiranda galimybė naudoti eksergiją tirti realiai funkcionuojančius procesus ar nustatyti gedimus (Peng Fu et al. 2016) ir įtraukti optimizavimo bei parametrinės analizės metodus, išnaudojančius imitacinio modeliavimo procesus (Bielskus et al. 2015).

Atsižvelgiant į analizės metu surinktus faktus, galima teigti, kad stokojama viešai prieinamų įrankių, leidžiančių automatizuoti TA atlikimą ir integraciją su pastatų imitacinio modeliavimo praktikoje naudojamais programinės įrangos paketais.

Eksergija išreiškia energijos kokybę priklausomai nuo apsupties sąlygų. Daugumoje termodinaminių vadovėlių, pristatančių eksergiją (Obert, 1960; Spanner, 1964; Bejan, 1988; Szargut et al. 1988; Borel, 2005) kaip ir daugelyje darbų, naudoja paralelę tarp proceso ir apsupties parametrų kokybei išreikšti.

Atsižvelgiant į aplinkos temperatūrą, yra didelis skirtumas tarp vadovėliuose pateikiamų ir taikomų pastovių sąlygų ir realaus klimato: fiziniai ir cheminiai aplinkos parametrai (slėgis, sudėtis ir ypač temperatūra) yra analizuojami kaip konstantos, tačiau realiomis sąlygomis šie parametrai juntamai svyruoja. Aplinkos temperatūra svyruoja daugiau kaip dešimtimis Kelvino laipsnių (Pons 2009) ir daro juntamą poveikį eksergijos kiekiui, procesams, vykstantiems arti aplinkos temperatūros. Todėl kintamą atskaitos būklę reikia apsvarstyti, kai proceso temperatūros yra santykinai artimos pastato vidaus sąlygoms (Zhou ir Gong 2013).

Ekserginės analizės atveju apsupties sąlygų pasirinkimas yra itin svarbus ir gali turėti didelį poveikį gaunamam analizės rezultatui. Bet kuriuo atveju tyrimo rezultatų jautrumas apsupties sąlygomis gali būti patikrintas ir sąlygų pastovumo arba kitimo pobūdis gali būti pasirinktas priklausomai nuo nagrinėjamos sistemos specifikos (Torio et. al., 2009).

Tačiau dauguma šiame darbe analizuotų publikacijų naudojami stacionariomis arba pastovumą laiko atžvilgiu išlaikančiomis sąlygomis. Atskaitinės apsupties sąlygos nagrinėtuose darbuose buvo pasirinktos pagal vieną iš kriterijų: sezono vidutinius parametrus; vidutinius metinius parametrus; normines sąlygas, kuriomis projektuojamos sistemos; ir kiti atvejai.

Kai kurie autoriai siūlo apsupties sąlygas įvardyti kaip kintančias meteorologines sąlygas, supančias pastatą. Šios aplinkos apibrėžimas reikalauja dinaminės energinės ir ekserginės analizės, todėl reikalinga išsamesnė ir sudėtingesnė analizė nei vien tik pastovaus lygio įvertinimas (Torio et al. 2009 Angelotti et al. 2012).

Kaip vienas iš identifikuojamų trukdžių analizės patikimumui yra galimos interpretacijų ir rezultatų variacijos. Pradedant termodinaminės analizės metodu, pagrįstą ATD, taikymą inžinerinėms sistemoms, būtina įvertinti energijos ir eksergijos analizės rezultatų kitimą atsižvelgiant į savybių pokytį apsupties sąlygų atžvilgiu (Utlu, Hepbasli 2007).

Atotrūkis tarp termodinaminės analizės metodų taikymo mokslinėse publikacijose ir praktinėje veikloje indikuoja apie populiarumo stoką inžinerinėje praktikoje. Kadangi viena iš termodinaminės analizės funkcijų yra tvarumo vertinimas, todėl tvaraus požiūrio stoka yra viena iš priežasčių, lemiančių šią situaciją. Rosen (Rosen 2013) atliko tyrimą, kurio rezultatai rodo, kad tvarią plėtrą ribojantys barjerai glūdi ekonominiuose kaštuose, kompetencijose, rinkos veiksmuose, vartotojų poreikiuose, korporatyvinėje kultūroje ir įsipareigojimuose. Taip pat veikia turimos paskatos, inertiškumas ir pokyčiai, esama praktika, įstatymai standartai ir reglamentai. Neatsiejama svarbą turi sėkmės istorijos, nesėkmės ir geriausios praktikos pavyzdžiai. Kadangi šie aspektai riboja tvariosios plėtros sklaidą ir integraciją, tai turi tiesioginį poveikį ATD pagrįstiems metodams, kurių funkcija yra kokybinis resursų tausojimas.

Dincer ir Rosen (2013) akcentuoja pagrindinius aspektus, kurie lemia pasirinkimą nenaudoti eksergijos ir entropijos inžinerinėje praktikoje:

- ekserginiai metodai laikomi per daug komplikuoti ir gremėzdiški naudotojams. Pavyzdžiui, apsupties temperatūros pasirinkimo komplikacijos leidžia akcentuoti šį argumentą.
- Ekserginės analizės rezultatai įvardijami kaip sunkiai interpretuojami, nesuprantami ir nepanaudojami.
- Daugelis potencialių metodo naudotojų yra nesusipažinę su šiuo metodu. Jie supažindinti su energine analize ir jos naudojimas jiems yra patogus ir priimtinas.
- Praktikuojantiems inžinieriams nepavyksta termodinamine analize pasiekti tiesioginių ir materialiai apčiuopiamų rezultatų.

Kaip pastebi Herwig (Herwig 2010), ATD metodai yra ignoruojami šilumos mainų mokslo šakos bendruomenėje. Todėl sunku įveikti egzistuojančią praktiką, pagrįstą „atsparumu pokyčiams“ (Erkal, Kebapci 2009). Entropija nėra minima labiausiai paplitusiuose vadovėliuose ir mokomosiose knygose, parašytose Incropera (Incropera 2006), Nellis ir Klein (Nellis, Klein 2011). Dėl šios priežasties netenkama vertingos informacijos dalies apie fizikinį procesą.

Ekserginis balansas gali išreikšti naudingo termodinaminio darbo kiekį, kuris yra proporcingas energijos ir pagamintos entropijos kiekiams esant konkrečioms apsupties sąlygoms. Tai taikoma ne tik bendrų procesų atveju, bet ir stacionarių, uždarų ir atvirų sistemų procesų atveju. Tokią balanso formuluootę be apribojimų galima taikyti stacionariems srautiniams procesams bei nestacionarių procesų atveju (Costa 2016).

Kitas aspektas yra procesai, vykstantys žemiau ir virš apsupties sąlygų. Shukuya (Shukuya 2009) pasiūlė „šiltos“ ir „šaltos“ eksergijos sąvokas siekdamas diferencijuoti ir gerinti supratimą apie procesų skirtumus.

Atlikus vėdinimo sistemos, šilumos atgavimo įrenginio (Martinaitis et al., 2017a) tyrimą, buvo nustatyta termodinaminių dėsnių pažeidimo rizika, jei

matematinės išraiškos būtų naudojamos visame temperatūrų diapazone, kai procesas vyksta virš, po ir per apsupties sąlygų parametrus. Palyginus su tipine matematine funkcija, termodinaminiams dydžiams išreikšti (palyginta su Boelman et. al 2009 pavyzdžiu) išryškinama galima eksergijos efektyvumo kitimo specifiška šiomis sąlygomis. Iš tyrimo rezultatų matyti, kad kintant bedimensinei apsupties temperatūrai, tradicinės išraiškos (Boelman et al. 2009) gaunamos vertės yra termodinamiškai nekorektiškos (efektyvumas tampa neigiamas).

Kaip įvardija Marmoleo ir Gundersen (Marmoleo, Gundersen 2012), svarbu pabrėžti, kad procesui, einančiam per apsupties temperatūrą, efektyvumo išraiška yra pasiūlyta Brodyansky (Brodyansky et al. 1994). Dabartiniai tyrimai atkreipia dėmesį į šią specifinę situaciją, kai eksergijos srautai kerta apsupties temperatūrą ir identifikuoja poreikį detaliau nagrinėti procesų modelius šiomis sąlygomis (Martinaitis et al. 2017).

Skaičiavimo modeliai gali būti sudėtingi ir parodyti skirtingus efektyvumo apskaičiavimo būdus, priklausančius nuo konkrečių proceso sąlygų (Martinaitis et al. 2017b). Siūlomas apibūdinimas identifikuoja 5 skirtingas sąlygas, kurios gali atsirasti vėdinimo šilumos regeneravimo įrenginyje ir siūlo matematines išraiškas, kai naudojamos koentalpijos siekiant išreikšti efektyvumą. Kitas būdas, leidžiantis išreikšti efektyvumą – pasinaudoti eksergijos kiekiais (Marmoleo, Gundersen 2012) ir Carnot koeficientais (Martinaitis, Streckienė 2016).

Šis aspektas yra labai svarbus mažus eksergijos srautus naudojančioms sistemoms, pvz., žemos temperatūros šildymo, aukštos temperatūros aušinimo ir šilumos siurblių, geoterminių gręžinių ir kitoms analogiškomis sistemoms. Šių sistemų nauda, privalumai ir funkcionavimo aspektai buvo tiriami įvairiuose mokslinių tyrimų projektuose, įskaitant ECBCS 49 (Schmidt 2009) ir 37 priedus (Shukuya, Hammache 2002).

1.4. Analizės proceso efektyvumas ir rezultatyvumas

Vykdomi procesai, kuriais yra siekiama sukurti produktą, daugeliu atvejų yra apriboti galimu skaičiuojamųjų ir laiko sąnaudų riba. Kadangi sąnaudų kiekis yra ribotas dėl įvairių priežasčių, yra tikslingas proceso vykdymas su mažiausiomis skaičiuojamosiomis ir laiko sąnaudomis išlaikant apibrėžtus kokybės kriterijus. Analizės efektyvumas nėra dažnai vertinamas ir analizuojamas. Šiame poskyryje apžvelgiama bendroji analizės efektyvumo sąsaja, vertės sukūrimo ir švaistymo sąvokos bei principai, taikomi gerosios praktikos metodikose.

Proceso efektyvumas arba rezultatyvumas (LST EN ISO 9001:2015) gali būti išreiškiamas sukuriama produkto ir reikalingų resursų arba sąnaudų santykiu. Šios išraiškos variacijos pateikiamos 1.4 formulėje

$$[Efektyvumas] = \frac{[Funkcija]}{[Resursai]} = 1 - \frac{[Nuostoliai]}{[Resursai]}. \quad (1.4)$$

Ši bendroji išraiška yra bendrai naudojama skirtingose mokslo šakose efektyvumui apibrėžti ir jo kitimui vertinti. Termodinaminėje analizėje naudojamos išraiškos yra analogiškos šioms formuluotėms.

Analogiškas efektyvumui dydis yra vertė, kuri gali būti suprantama kaip nematerialus dydis, išreiškiantis, kaip gerai organizacija, projektas arba produktas patenkina suinteresuotųjų šalių poreikius priklausomai nuo sunaudotų išteklių [LST EN 1325:2014]. Šis konceptas gali būti iliustruojamas pagal standarte pateikiamą formuluotę:

$$[Vertė] = \frac{[Funkcijos atlikimas]}{[Resursų sunaudojimas]}. \quad (1.5)$$

Tam, kad poreikiai būtų įvertinti objektyviai ir aiškiai suprantami analizės atlikėjų, turi būti aiškiai apibrėžta funkcija arba funkcijos, kurios struktūroja turimus poreikius ir / arba įvardija būtinus tenkinti apribojimus. Funkcinė analizė (FA) gali būti suprantama kaip procesas, kurio metu aprašomos ir apibūdinamos funkcijos ir jų tarpusavio priklausomybės, kurios yra sistemingai charakterizuojamos, klasifikuojamos ir įvertinamos išreiškiant skaitinėmis išraiškomis arba kaštais (ASTME 2013–12, LST EN 16271:2013).

1.4.1. Efektyvumo didinimo galimybės

Siekiant našaus ir rezultatyvaus sistemų kūrimo proceso, svarbu vykdyti veiksmus, leidžiančius racionaliai organizuoti veiksmų seką, efektyviai naudotis prieinamais resursais bei sąnaudomis ir maksimizuoti sukuriamą vertę (Rother, Shook 1999). Pasinaudojant standarto LST EN 1325:2014 apibrėžiančių vertės vadybos (VV) ir vertės inžinerijos (LST EN 16271:2013) bei „Lean“ vadybos sistemos principais (Womack 1990) suformuotas skaičiavimo procedūrų procesas šio darbo apimtyse gali būti supaprastinamas eliminuojant vertės nekuriančius veiksmus. Tačiau svarbu akcentuoti, kad sąnaudų mažinimas, kenkiantis poreikių tenkinimo kokybei yra griežtai apribojamas ir nėra laikomas vertę didinančiu sprendimu (LST EN 12973:2000). Pagrindiniai LEAN arba „Toyota Production System“ (Taiichi 1998) aspektai suprantami kaip būtinas vykdomos veiklos, procesų ir strategijų pagrindas, kuriuo yra grindžiamas procesų ir veiklos vykdymas: vertė, vertės srautai, procesas, „traukimas“ (angl. *pull*) ir tobulumo siekimas (perfekcionizmas).

Šiuo atveju galimas sudaryto modelio ir pateikiamos agreguotos informacijos naudotojas gali būti inžinierius, analitikas, siekiantis sumažinti kuriamos sistemos

poveikį aplinkai sumažinant energijos kokybės poreikį sistemai funkcionuoti ir didinant žemos kokybės šaltinių išnaudojimo galimybes. Inžinerinių sprendimų priėmimo kontekste (Herrmann 2015), siekiant korektiško sprendimo, svarbu išvengti neracionalių veiksmų (Simon 1997, Stirling 2003, Herrmann 2015) ir remtis racionalumo principais. Termohidrodinaminių kontūrų analizės atveju neracionalūs veiksmai sukuria žmoniškųjų ir skaičiuojamųjų sąnaudų švaistymą, todėl formuojant efektyvų sprendimų priėmimo procesą, yra kritiškai svarbu žinoti esminius racionalumo užtikrinimo principus. Laikantis racionalumo principų, išvengiama loginių klaidų, kai modeliavimas ir analizė reikalauja daugiau išteklių nei faktiškai sukuriamą naudą (Banks, Gibson 1997).

Vertės išraiškos (1.5 formulė) vardiklis gali būti išskaidytas į resursus, reikalingus idealaus proceso atveju ir neefektyviai naudojamus arba „švaistymo“ dedamąsias. Tokia analogija yra pritaikyta iš „Lean“ mąstymo (Womack 1990) metodikos. Švaistymas (jap. „muda“) gali būti apibrėžtas kaip veiksniai, kurie didina reikalingų resursų ir sąnaudų kieki.

$$[Vertė] = \frac{[Funkcija]}{[Resursai]} = \frac{[Funkcija]}{[Resursai] + [\text{Švaistymas}]} \quad (1.6)$$

Pagrindinės švaistymo priežastys, pritaikyta projektavimo ir inžinerinės analizės procesui, pagal *MIT Lean Academy* (Murman et al. 2012) yra: nereikalingi analizės veiksmai ir ataskaitų rengimas (perteklinė produkcija); neužbaigtos analizės, ataskaitos, bandymai (inventorizavimas); ataskaitų pateikimas, kompleksiškos validavimo procedūros (transportavimas); „stop–marš“ operacijos, darbas su keletu projektų lygiagrečiai (nereikalingas statuso keitimas); sprendimo arba pradinės informacijos laukimas (laukimas); perdarymas dėl klaidingų reikalavimų arba įvesties duomenų bei klaidos, kurių ištaisymas reikalauja papildomų pastangų (defektai); nereikalingas funkcionalumas, perteklinė komunikacija, esamų sprendimų kūrimas iš naujo (perteklinis apdorojimas); inžinieriai nėra skatinami tobulinti esamo proceso (neišnaudotas kūrybiškumas).

Formuojant analizės ir sprendimų priėmimo būdus termohidrodinaminių kontūrų sistemoms, tikslinga atsižvelgti į šiuos principus, kurie leidžia užtikrinti pridėtinės naudos sukūrimą ir žmoniškųjų ir skaičiuojamųjų sąnaudų tausoją.

Kitas svarbus aspektas, kurį galima pritaikyti analizės metodų formavimui, yra „traukimas“ (angl. *pull*) principas – informacija turi būti generuojama tik tada, kai yra reikalinga (tam yra poreikis ir šių veiksmų atlikimas sukuria arba padidina naudą). Tai yra priešinga „stūmimo“ (angl. *push*) principui, kuris siūlytų nuodugnią ir plačią apimtį analizę, išnaudojant visus turimus resursus. Pritaikius traukimo principą ir sprendimo priėmimo reikiamu laiku (angl. *Just in time*), analizė gali būti vykdoma nustatant detalesnius tikslus ir kryptis proceso

eigoje (Colier 2011), kaip tai yra būdinga „Agile“ analizės ir projektų valdymo metodikoms. (PMI 2017).

1.4.2. Neapibrėžtumas ir tikslumas

Sprendinio kokybė gali būti įvertinama šio neapibrėžtumu ir tikslumu. Termodinaminės analizės metodikos naudojami pirminiais kintamaisiais (temperatūra, slėgiu, greičiu, mase), kurių tikslumas nulemia sprendinio tikslumą. Kadangi pagrindinė termodinaminės analizės metodų funkcija yra proceso įvertinimas, pirminių kintamųjų apskaičiavimas yra atliekamas kitais būdais, pagrįstais šilumos mainų ir skysčių mechanikos metodais.

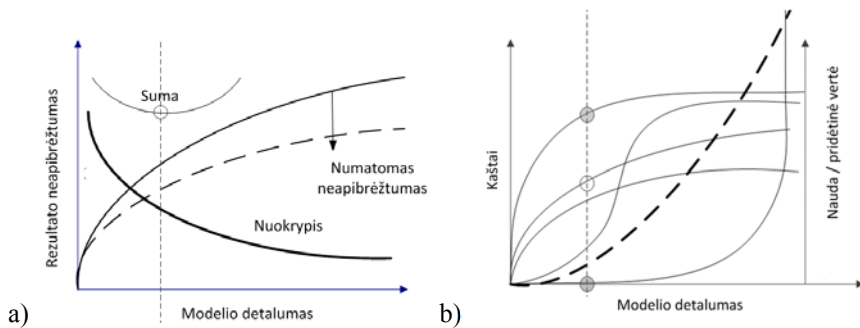
Pasirenkant modelio detalumo lygį, būtina atsižvelgti į laiko ir skaičiuojamąsias sąnaudas, reikalingas išpildyti modelį (žmogaus darbo valandos, skaičiuojamosios sąnaudos) ir gaunamą naudą (vertę – rezultatų pritaikomumą). Modeliuojant skirtingus procesus, didėjant modelio detalumui, gaunamos informacijos kiekis ir tikslumas kinta nevienodai:

- pastovios niutoninio skysčio tėkmės empirinėmis koreliacijomis pagrįsto modelio pakeitimas skaičiuojamosios fluidų dinamikos modeliu turi nežymų poveikį rezultato tikslumui (Herwig, Wenterodt 2011);
- šilumokaičiuose dėl specifinės geometrijos ir šilumos mainų intensyvumo kitimo aukštesnio detalumo modelių rezultatas santykinai skirsis nuo supaprastintų modelių su fiksuotais parametrais (Kind, Martin 2010);
- akumuliacinės talpos supaprastintų modelių sprendiniai gali gerokai skirtis dėl taikomų prielaidų, apibūdinančių srautų maišymąsi ir taikomų skaičiuojamųjų metodų (Streckienė 2011).

Dėl šių priežasčių modelio kompleksiško didinimas ne visais atvejais sukuria naudą analizės procesui. Skirtingiems fizikiniams reiškiniams atspindėti detalumo pokytis gali atnešti skirtingą naudos prieaugį, kaip tai iliustruoja Trčka 2008 pateiktas principinių tendencijų eskizas (1.8 pav.).

1.8 paveiksle, a reprezentuoja modeliavimo rezultatų tikslumo priklausomybė nuo modelio detalumo. b paveiksle – kaštų kitimo kreivės esant skirtingiems modeliavimo metodams kitimas augant modelio detalumui.

Atsižvelgiant į šiuos principus, galima teigti, kad tikslinga didinti 3D elementų detalumo lygmenį siekiant įvardyti temperatūros ir slėgio pasiskirstymo laukus. Elementai, kurių „elgsena“ padidinus modelio detalumo lygį pakinta minimaliai, gali būti vertinti supaprastintu būdu, jei nėra nukrypstama nuo sąlygų, kurioms esant buvo suformuoti empiriniai modeliai



1.8 pav. Modelio neapibrėžties ir nuokrypio tendencijos kintant detalumui (a) ir modelio detalumo didinimo nauda (b)

Fig. 1.8. The tendencies of uncertainty and deviation of true results due to variation of model detailness (a) and The benefit due to increase of detailness level (b)

Galima teigti, kad tikslinga atlikti skirtingo detalumo lygio elementų modeliavimą termohidrodinaminėse sistemose varijuojant detalumo lygiu priklausomai nuo iš modelio gaunamos vertės.

Apibendrinant atliktą literatūros šaltinių analizę, galima įvardyti disertacijos tematikai svarbius aspektus: imitacinio modeliavimo detalumas, taikomosios termodinaminės analizės metodai ir analizės proceso efektyvumas. Kontekstas, esantis šių aspektų sankirtoje plėtojamas tolesniuose disertacijos skyriuose.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Reikalingas aiškus metodas arba jų derinys, kuriuo būtų galima identifikuoti termohidrodinaminių kontūrų sistemos tobulinimo galimybes. Taip pat reikalingas procesas, vedantis į sistemos patobulinimus.

2. Dėl programinės įrangos stokos, ribojamas TA metodų paplitimas inžinerinėje praktikoje. Todėl reikalinga integracija į esamus programinės įrangos paketus.

3. Dėl neaiškių taikymo ribų, matematiniai modeliai įgauna klaidingas reikšmes, tokiu būdu kompromituodami TA rezultatus. Siekiant išvengti klaidingų interpretacijų, būtina apibrėžti jų taikymo ribas.

4. Dėl vertės atskleidimo stokos nėra aišku, kada, kokius metodus taikyti, todėl reikalinga susieti skirtingus TA metodus, jų taikymo galimybes ir privalumus.

5. Dėl nepakankamo TA brandos lygio, apribojamos integracijos į inžinerinę praktiką galimybės. Procesų sudarymas, nuoseklus naudos kūrimas leistų

padidinti metodų brandos lygmenį ir atvertų galimybes TA pagrįstų metodų integracijai į gerąją praktiką.

Įvertinus mokslinėje literatūroje išnagrinėtus klausimus ir atsižvelgus į disertacijos darbo tikslą, svarbu išspręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti mokslinių tyrimų analizę: nustatyti termodinaminės analizės metodų taikymo spragas.
2. Sukurti sezoninio termodinaminio efektyvumo vertinimo metodą sistemai, susidedančiai iš termohidrodinaminių kontūrų.
3. Nustatyti skaitinių modelių detalumo lygį, reikalingą objektyviai įvertinti sezoninius rodiklius ir atpažinti efektyvumo didinimo trukdžius.
4. Sudaryti metodinę veiksmų seką, tinkamą nuosekliai didinti sistemos efektyvumą, identifikuojant kritinius trukdžius.
5. Pritaikyti sudarytą metodiką praktiniam termohidrodinaminių kontūrų sistemos atvejo tyrimui.

Termodinaminio sezoninio efektyvumo nustatymo ir gerinimo metodas

Tvarų resursų panaudojimą galima įvertinti pasitelkiant termodinaminės analizės metodus, išreiškiančius efektyvumą pagal pirmąjį ir antrąjį termodinamikos dėsnius. Pastatą aptarnaujančių energijos tiekimo grandinių efektyvumas nuolatos kinta. Todėl reikalinga išraiška, integruojanti atskirų laiko periodų rodiklius į vieną sezoninį rodiklį. Tam, kad šia termodinaminio sezoninio efektyvumo metrika būtų pasinaudota ne tik vertinant sistemos tvarumo laipsnį, reikalingos procedūros, kurios padeda identifikuoti sistemos tobulinimą apribojančius veiksnius. Šių neigiamą poveikį turinčių veiksnių koregavimas leidžia padidinti sistemos efektyvumą ir tvarumą. Kryptinga ribojančių veiksnių paieška įgalina sumažinti skaičiuojamąsias ir laiko sąnaudas analizei atlikti ir padidinti sistemos koncepcijos projektavimo ar funkcionuojančios sistemos diagnostavimo efektyvumą.

Šiame skyriuje pristatomas sukurtas termodinaminio sezoninio efektyvumo (TSE) nustatymo metodas. Pasitelkiant specifinius termodinaminės analizės metodus, identifikuojamos TSE gerinimo galimybės. Šių procedūrų generuojama informacija apdorojama identifikuojant kritinius sistemos funkcionavimo aspektus ir priskiriant prioritetus jų detalesnei analizei. Visas šias procedūras į vieną visumą apjungia metodika, suformuota laikantis gerosios praktikos

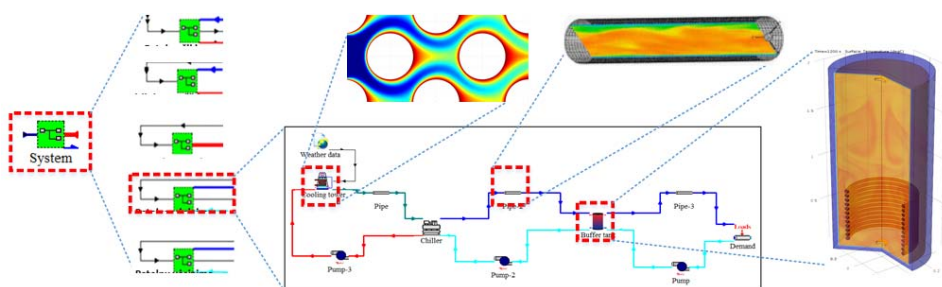
principų, leidžiančių menkliau švaistyti sumažinant skaičiuojamąsias ir laiko sąnaudas.

Tolesniuose poskyriuose aprašomi termodinaminės analizės taikymo principai THDK sistemoms, termodinaminis sezoninis efektyvumas, modeliavimo ir analizės metodų suderinamas ir tarpusavio sąsajų išnaudojimas, specifinių termodinaminės analizės metodų taikymas, skirtingus termodinaminės analizės metodus integruojantis TSE gerinimo metodas.

Skyriaus tematika paskelbtos dvi autoriaus publikacijos (Martinaitis et al. 2017; Januševičius et al. 2017).

2.1. Termodinaminio sezoninio efektyvumo gerinimo metodika

Metodikos siekiamybė gali būti apibrėžta kaip didesniu tvarumu pasižyminčios sistemos sukūrimas. Taikant šią metodiką, sistema skaidoma pagal detalumo lygmenis: sistemą, posistemius, komponentų grupes, komponentus ir komponentų vidinę konfigūraciją. Priklausomai nuo detalumo lygmens, pasirenkamos tinkamos procesų modeliavimo priemonės ir metodai siekiant apdoroti gaunamus rezultatus. Analizuojant sistemą nuosekliai nuo mažiausio iki didžiausio detalumo lygmens, kinta skaičiuojamųjų resursų poreikis. Dėl šios priežasties svarbu nustatyti tolesnės analizės prioritetus. Nagrinėjant ne visą, o tik didžiausią poveikį sezoniniam termodinaminiam rodikliui turinčius komponentus, sumažinamas skaičiuojamųjų resursų poreikis rezultatyviam analizės procesui atlikti. Asociatyvi termohidrodinaminių kontūrų sistemos dekompozicija pateikiama 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Termohidrodinaminių kontūrų sistemos dekompozicijos schema

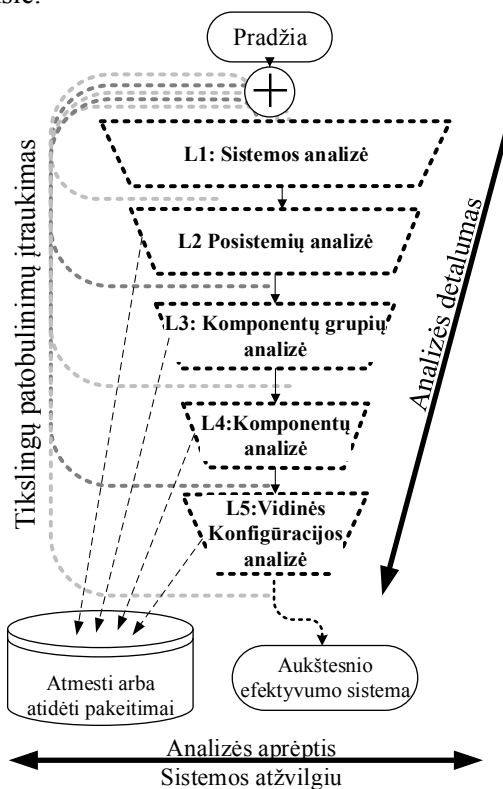
Fig. 2.1. Decomposition of termohydrodynamic contour system

Siekiant efektyviai įgyvendinti esminį tikslą, analizės etapuose turi būti išskirti tarpiniai arba sub-tiksai. Tai yra kritiškai svarbu bandant suprasti, kuria linkme turi būti nukreiptos analizę atliekančiųjų pastangos, išlaikyti

koncentraciją, siekti rezultato nenukrypstant į procesus ir veiksmus, nekuriančius tiesioginės naudos norint didinti sistemos efektyvumą.

Integravus šį sudėtinį procesą į nuolatos vykdomas sistemų optimizavimo procedūras, naujai identifikuojami efektyvūs sprendimai nuolatos papildo žinomų naudingų sprendimų aibę. Žinomi realaus tobulinimo potencialo rodikliai leidžia suvokti neišnaudotą sistemos efektyvumo didinimo potencialą iki realiai pasiekiamos ribos. Nuolatinis patirties kaupimas leidžia efektyviau aptikti galimas alternatyvas ir tobulinimo scenarijus.

Atsižvelgiant į siekiamybę padidinti sistemos efektyvumą ir rezultatyvios metodikos formulavimo principus, suformuojama veiksmų seka, apjungianti skirtingus taikomosios termodinamikos metodus. Principinių žingsnių schema pateikiama 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Sistemos termodinaminio sezoninio efektyvumo tobulinimo proceso diagrama

Fig. 2.2. Diagram of thermodynamic seasonal efficiency improvement process

Pateikta integruota taikomosios termodinaminės analizės priemonių metodika gali būti matoma kaip tiesinis procesas, vedantis sprendimo link. Šio

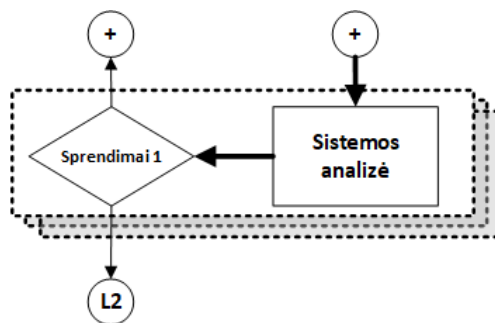
proceso integracija į sistemų kūrimo ir projektavimo procesus gali tapti dar naudingesnė, jei šis procesas bus atliekamas iteraciniu principu – tokiu būdu tolesniuose etapuose identifikuojami sprendimai papildo žinomų sprendinių aibę ir tokiu būdu efektyvus, ankstesnėse iteracijose identifikuoti sprendimai priimami greičiau, su mažesnėmis skaičiuojamosiomis ir laiko sąnaudomis.

Svarbu dokumentuoti priimamus sprendimus pagrindžiant elemento atsiradimą analizės etape. Ankstesnių sprendimų supratimas yra svarbus tam, kad sintezės metu integruojant įvykdytus pakeitimus į sistemą, būtų galima įvertinti atliktų korekcinį veiksmų rezultatyvumą.

Metodika apibendrina sistemos dekompozicijos kitimo nuoseklumą ir analizuojamos sistemos kompleksiskumo augimo nuoseklumą. Formuojant šį metodą, siekiama išlaikyti pusiausvyrą tarp detalių ir elementų, lemiančių sistemos sezoninį efektyvumą ir bendrojo visų sistemų poveikio visuminiam sezoninio efektyvumo rodikliui. Tolesniuose skirsniuose (2.1.1–2.1.5) detalizuojami veiksmai atskiruose metodikos etapuose.

2.1.1. Sistemos lygmuo (L1)

Termohidrodinaminių kontūrų sistema gali būti suprantama kaip atskirų energinių paslaugų tiekimo grandinių grupė. Sistema šio darbo apimtyse suprantama kaip daugiau nei vieną energinę paslaugą teikianti sistema. Apribojus kontroliniu tūriu sistemos ribas, įvertinami šią ribą kertantys masės ir energijos srautai ir jų kokybinės išraiškos. Šiame lygmenyje sistemos analizė atliekama pasitelkiant 2.2 poskyryje aprašytą metodiką, adaptuotą termohidrodinaminių kontūrų sistemai. Atlikus termodinaminių rodiklių apskaičiavimą pritaikomas šiame darbe pateikto termodinaminio sezoninio efektyvumo rodiklio apskaičiavimo metodas (detaliau aprašyta 2.3 poskyryje). Sprendimų priėmimui pasitelkiama sudaryta prioritetų nustatymo tvarka pagal P0 ir P1 faktorius (2.5.1 ir 2.5.2 skirsniai). Šio lygmens informacijos srautų schema pateikiama 2.3 paveiksle.



2.3 pav. Sistemos lygmens informacijos srautų diagrama

Fig. 2.3. The information flow diagram of system level

Lygmuo yra susietas su kitais lygmenimis šiais ryšiais: gaunant informaciją pirminiam arba pakartotiniam sistemos analizavimui, taikant šiame lygmenyje tinkamas analizės metodikas. Agreguoti duomenys perduodami sprendimo priėmimo subprocesui, kuriame, atsižvelgiant į prioriteto faktorius, sistema yra analizuojama detaliau (L2) arba keičiama. Įvykdžius pakeitimus, reikalingas pakartotinis sistemos rodiklių įvertinimas, todėl ciklas nuo pat pradinio etapo yra kartojamas (+).

Siekiant geriau suprasti TSE rodiklio vertės kitimo ribas, gali būti naudojami etaloninių (angl. *Benchmark*) – „geros“ ir „blogos“ sistemos rodikliai, kurie generuojami pagal skaičiuojamos sistemos energijos srautus pritaikant kokybės koeficientus. „Geros“ sistemos etalonas reprezentuoja energiška efektyvią žematemperatūrinį šildymą ir aukštatemperatūrinį vėsinimą naudojančias sistemas, kuriose energinių paslaugų reikmėms gaminamos ir transformuojamos energijos kokybės lygis atitinka energinės paslaugos teikimui reikalingą kokybės lygį. „Blogos“ sistemos etalonas reprezentuoja aukštos kokybės energijos naudojimą energinių paslaugų teikimui.

Visos sistemos atveju sistemos efektyvumas gali būti išreikštas apibendrinat visų posistemių srautus ir naudojant prielaidas „geram“ ir „blogam“ sistemų etalonams:

$$\eta_{II.sist} = \frac{Ex_{hs} + Ex_{cs} + Ex_{vent} + Ex_{DHW}}{N_1 + N_2 + N_3 + N_4}, \quad (2.1)$$

čia $N_1 = (Q_{hs} \cdot \eta_{c.hs} + W_{pumps.hs} + W_{FCU.hs})$; $N_2 = (Q_{cs} \cdot \eta_{c.cs} + W_{pumps.cs} + W_{FCU.cs})$; $N_3 = (Q_{vent} \cdot \eta_{c.vent} + W_{pumps.vent} + W_{fans.vent})$; $N_4 = (Q_{DHWvent} \cdot \eta_{c.DHW})$; Ex – eksergijos srautai; Q – šiluminės energijos srautai, η_c – energijos kokybės rodiklis; W – termodinaminis mechaninis darbas. Indeksai detalizuoti simbolių saraše.

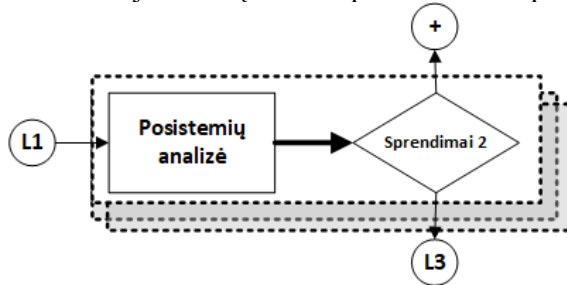
Sezoninis efektyvumas išreiškiamas analogiškai kaip ir įprastiniu atveju pasinaudojant svoriniu koeficientu C_i . Sudaryta detalesnė etalonų apskaičiavimo tvarka pateikiama 2.3.4 skirsnyje. Koeficientų vertės išraiškos detalizuojamos *H priede*.

2.1.2. Posistemių lygmuo (L2)

Posistemiai yra sistemos dedamieji, teikiantys vieną energinę paslaugą arba funkciją. Suskaidžius sistemą į atskirus posistemius, įvertinamas atskirų energinių paslaugų funkcijų efektyvumo rodiklis TSE. Gaunama informacija leidžia identifikuoti posistemius, darančias didžiausią neigiamą įtaką visos sistemos TSE. Šiame lygmenyje posistemį ribojančio kontrolinio tūrio analizė atliekama pasitelkiant 2.2 poskyryje aprašytą metodiką, adaptuotą termohidrodinaminių kontūrų sistemai. Atlikus termodinaminių rodiklių apskaičiavimą pritaikomas

šiam darbe pristatomas termodinaminio sezoninio efektyvumo rodiklio apskaičiavimo metodas (detaliau aprašyta 2.3 poskyryje). Sprendimų priėmimui pasitelkiama sudaryta prioritetų nustatymo tvarka pagal P0, P1, P2 faktorius (2.5.1; 2.5.2; 2.5.3 skirsniai). Sistemos TSE rodiklis, susidedantis iš atskirų posistemių TSE rodiklių, gali būti išreikštas pasinaudojant sudarytu integracijos metodu (pagal 2.3.2 skirsnį)

Šio lygmens informacijos srautų schema pateikiama 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Posistemių lygmens informacijos srautų diagrama

Fig. 2.4. The information flow diagram of subsystem level

Atlikus analizę posistemių lygmenyje, generuota informacija perduodama sprendimų priėmimo sub–procesui, kuriame pasitelkiant prioriteto faktorius yra identifikuojamos posistemiai, turintys didžiausią neigiamą poveikį visos sistemos TSE rodikliui. Nesant galimybės identifikuoti trukdžių siekiant padidinti efektyvumą kilmę, posistemis gali būti analizuojama detaliau (L3). Turint alternatyvius posistemius arba atlikus keitimus, gerinančius posistemo TSE rodiklį, reikalinga pakartotinai įvertinti visos sistemos efektyvumą (+).

Siekiant geriau suprasti energinių paslaugų tiekimo grandinių termodinaminį sezoninį efektyvumą (TSE), reikia turėti atskaitines–etalonines sistemas, kurių atžvilgiu įvertinamas konkretus konfigūracijos atvejis. Ši atskaitos sistema formuojama pasitelkiant „blogą“ ir „gerą“ termodinaminį efektyvumą užtikrinančias sistemų konfigūracijas.

Patalpų šildymo sistemos atveju:

$$\eta_{hs} = \frac{Ex_{hs}}{Q_{hs} \cdot \eta_c + W_{pumps} + W_{FCU}}. \quad (2.2)$$

Patalpų vėsinimo sistemos atveju:

$$\eta_{cs} = \frac{Ex_{cs}}{\frac{Q_{cs}}{COP_c} \cdot \eta_c + W_{pumps} + W_{FCU}}, \quad (2.3)$$

čia COP – šaltinio mašinos momentinis efektyvumas.

Patalpų vėdinimo sistemos atveju, kai sistema pašildo tiekiamą orą:

$$\eta_{vent} = \frac{Ex_{vent}}{Q_{vent} \cdot \eta_c + W_{fans} + W_{pumps}}. \quad (2.4)$$

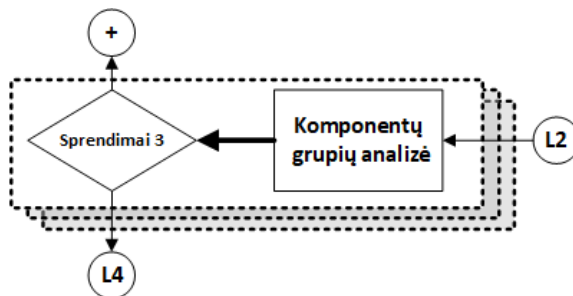
Buitinio karšto vandens tiekimo atveju:

$$\eta_{DHW} = \frac{Ex_{DHW}}{Q_{DHW} \cdot \eta_c + W_{pump}}. \quad (2.5)$$

Sudaryta detalesnė koeficientų apskaičiavimo tvarka „gero“ ir „blogo“ posistemų etalonų atveju yra pateikiama 2.3.4 skirsnyje. Koeficientų vertės išraiškos detalizuojamos *H priede*.

2.1.3. Komponentų grupių lygmuo (L3)

Posistemius sudarantys komponentai gali būti grupuojami pagal atliekamą funkciją tokiu būdu tarp posistemų ir komponentų sudarant tarpinį detalumo lygmenį, leidžiantį supaprastinti termodinaminio efektyvumo išraišką išvengiant slėgio pokyčio vertinimo komponentų grupėse. Elementai, atliekantys specifinę funkciją energinės paslaugos tiekimo grandinėje gali būti sugrupuoti į gamybos, perdavimo, transformavimo ir galutinę paslaugą teikiančių įrenginių grupes. Tokiu būdu gali būti sugrupuojami lygiagretūs elementai, atliekantys tą pačią funkciją nagrinėjamoje grandinėje. Šio lygmens informacijos srautų schema pateikiama 2.5 paveiksle.



2.5 pav. Komponentų grupės lygmens informacijos srautų diagrama

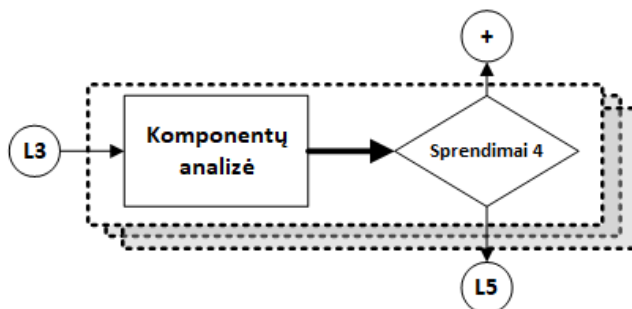
Fig. 2.5. The information flow diagram of component group level

Šiame lygmenyje komponentų grupę ribojančio kontrolinio tūrio analizė atliekama analogiška tvarka ankstesniems detalumo lygmenims. Sprendimų priėmimui pasitelkiama sudaryta prioritetų nustatymo tvarka pagal P0, P1, P2, P3 faktoriai (2.5.1–2.5.4 skirsniai). Sistemos TSE rodiklis, susidedantis iš atskirų komponentų grupių TSE rodiklių, gali būti išreikštas pasinaudojant sudarytu

integracijos metodu (pagal 2.3.2 skirsnį). Šiame detalumo lygmenyje taikomos termohidrodinaminių kontūrų sistemai adaptuotas išplėstinės termodinaminės analizės metodas (detaliau 2.6 poskyryje).

2.1.4. Komponentų lygmuo (L4)

Komponentai yra tarpusavyje sąveikaujančios sistemos dedamosios. Komponentų viduje vykstantys šilumos mainų ir skysčių mechanikos procesai lemia komponentų efektyvumą. Kiekvienas elementas turi savo funkciją, kuri gali būti apibūdinama konkrečiu veiksmu, kurį komponentas atlieka sistemoje. Šio lygmens informacijos srautų schema pateikiama 2.6 paveiksle.



2.6 pav. Komponentų lygmens informacijos srautų diagrama

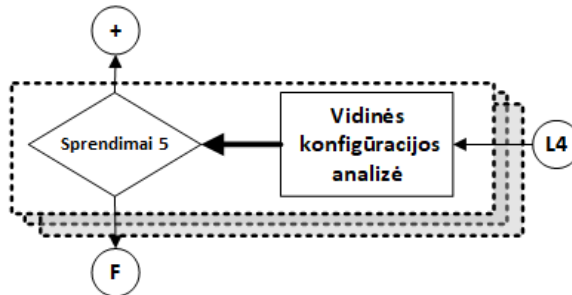
Fig. 2.6. The information flow diagram of component level

Šiame lygmenyje komponentą ribojančio kontrolinio tūrio analizė atliekama analogiška tvarka ankstesniems detalumo lygmenims. Sprendimų priėmimui pasitelkiama sudaryta prioritetų nustatymo tvarka pagal P1, P2, P3, P4 faktorius (2.5.2–2.5.5 skirsniai). Sistemos TSE rodiklis, susidedantis iš atskirų komponentų TSE rodiklių, gali būti išreikštas pasinaudojant sudarytu integracijos metodus susietiams ir lygiagretiems kontroliniams tūriams (pagal 2.3.2 skirsnis). Šiame detalumo lygmenyje taikomos termohidrodinaminių kontūrų sistemai adaptuotas išplėstinės termodinaminės analizės (2.6 poskyris) metodas ir šiame darbe sudarytas realaus tobulinimo potencialo nustatymo metodas (pagal 2.4 poskyris).

2.1.5. Vidinės konfigūracijos lygmuo (L5)

Komponentai yra sudaryti iš atskirų elementų. Dėl šilumos mainų ir skysčių tėkmės procesų vykstantys šiuose elementuose lemia efektyvumo charakteristikas pagal PTD ir ATD. Identifikavus elementus, kurių tobulinimas negali būti atliekamas tiesiogiai koreguojant funkcionavimo parametrus arba kitų elementų charakteristikas, tikslinga įvertinti entropijos generavimo struktūrą ir elementų

vidinės konfigūracijos ir geometrijos poveikį sukurama termodinaminių negrįžtamųjų kiekiui. Šio lygmens informacijos srautų schema pateikta 2.7 paveiksle.



2.7 pav. Vidinės konfigūracijos lygmens informacijos srautų diagrama

Fig. 2.7. The information flow diagram of internal configuration level

Šiame detalumo lygmenyje taikomas termohidrodinaminių kontūrų sistemos atvejui adaptuotas lokalaus entropijos generavimo metodas (2.6 poskyris). Šiuo metodu iš SFD modeliavimo rezultatų nustatoma geometrinė entropijos generavimo lokacija ir pasiskirstymo tankis.

2.2. Termodinaminis šilumos mainų ir skysčių mechanikos procesų vertinimas

Šilumos mainų ir skysčių mechanikos procesai yra glaudžiai susieti ir tarpusavyje sąveikaujantys. Inžinerinėse sistemose, sudarytose iš termohidrodinaminių kontūrų, šiais procesais transformuojama ir pernešama energija iš vienos sistemos dalies į kitą tam kad būtų atliekama sistemos funkcija – šildyti, vėsinti, sausinti, drėkinti patalpas ar į jas tiekiamą išorės orą, teikti kitas energines paslaugas.

Siekiant suvokti šių procesų efektyvumą ir rezultatyvumą, pasitelkiami termodinaminės analizės metodai. Šiais metodais apibrėžiamos termodinaminės sistemos ribos ir įvertinami šias ribas kertantys (įeinantys ir išeinantys) masės ir energijos srautai. Šie srautai gali būti vertinami kiekybiniu (pirmasis termodinamikos dėsnis PTD) ir kiekybiniu (antrasis termodinamikos dėsnis ATD) požiūriais. Abiejų šių požiūrių taikymas apibendrintai vadinamas Termodinamine Analize (TA). Inžinerinėje praktikoje projektuojant sistemas pagrindinis akcentas tenka kiekybiniam (PTD) požiūriui. Siekiant atskirti šiuos skirtingus taikymo metodus, tik PTD naudojamieji metodai yra įvardijami kaip Energinė Analizė (EA).

Šiame poskyryje aprašomi susietųjų šilumos mainų ir skysčių mechanikos procesų termodinaminis vertinimas kiekybiniu ir kiekybiniu būdais ir jų išraiška

termodinaminio efektyvumo rodikliais – eksergijos srautais, termodinaminiu efektyvumu ir entropijos generavimu.

2.2.1. Termodinaminės analizės taikymas

Esminių termohidrodinaminių kontūrų sistemose ir energinių paslaugų teikimo grandinėse sutinkamų elementų masės ir energijos srautai yra modeliuojami kaip kiekybinės procesų funkcijų išraiškos.

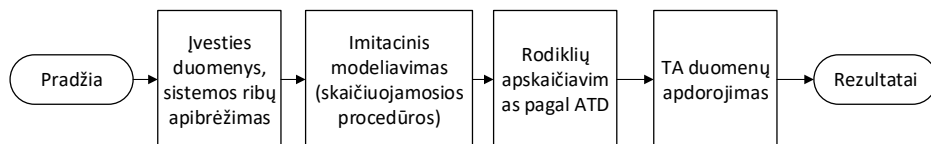
Svarbus termodinaminės analizės metodų taikymo aspektas – rezultatų validumas ir verifikacija. Kaip įvardija Oberkampf (2002) (Oberkampf, Trucano 2002) – verifikacija yra skaičiuojamojo modelio tikslumo įvertinimas lyginant su žinomais sprendimais. Validacija – eksperimentinio tyrimo ir skaičiuojamojo modelio palyginimas.

Bejan (2017) atkreipia dėmesį, kad termodinaminės analizės kontekste gali kilti nesusipratimų dėl termodinaminės būklės parametro entropijos, nes šis dydis negali būti tiesiogiai išmatuojamas. Termodinaminės būklės parametrai gali būti skaidomi į išmatuojamus (slėgis, temperatūra, tūris, savitoji šiluma) ir išvestinius (Energija, Eksergija, Entropija) kurie yra gaunami pasitelkiant išmatuojamus dydžius.

Remiantis verifikavimo ir validacijos aspektais (Kleindorfer et al. 1998; Oberkampf, Roy 2010), etalono teisingumas, su kuriuos yra lyginamas gaunamas rezultatas, privalo būti nediskutuotinas. Kadangi termodinaminė analizė privalo išlaikyti tvirtumą, analizės rezultatai turi tenkinti šiuos dėsnius ir kitas termodinamikos teorijas, tam kad būtų galima deklaruoti sprendinių teisingumą.

Nesant validavimo ir verifikavimo procedūrų yra sudėtinga pagrįsti gaunamų rezultatų teisingumą ir korektiškumą (Oberkampf, Roy 2010). Dėl šios priežasties galima teigti, kad nepaisant metodo populiarumo ir didelio kiekio publikacijų, validavimo ir verifikacijos procedūrų stoka turi neigiamą poveikį termodinaminės analizės imunitetui ir gebėjimui atlaikyti kritiką.

Esminiai žingsniai, reikalingi atlikti termodinaminę analizę, gali būti apibendrintai pateikti (2.8 pav.) agreguojant publikacijose ir literatūroje pateikiamą proceso eigą.



2.8 pav. Tipinė termodinaminės analizės eiga

Fig. 2.8. Typical workflow of thermodynamic analysis

Atlikus pirmąjį vertinimo žingsnį, gaunamas esamos situacijos įvertinimas ir objektyvus atotrūkio tarp išsikeldo tikslo ir turimo sezoninio efektyvumo įvertinimas. Atlikus šiuos veiksmus, galima atskirų dedamųjų, darančių poveikį analizė.

Termohidrodinaminių kontūrų sistemos modeliavimas atliekamas TRNSYS aplinkoje. Sistemos modelis sudaromas ir komponentų modelių, kurie yra validuoti empiriškai arba pagrįsti analitiniais sprendiniais. Atliekant imitacinį modeliavimą užtikrinama, kad būtų išlaikomi masės ir energijos balanso principai užtikrinantys korektiškumą realių fizikinių procesų atžvilgiu. TRNSYS modeliavimo priemonėje, validumo balanso dėsniams patikra yra automatiškai vykdoma kiekviename elemente. Skaičiuojamosios fluidų dinamikos modelis validuotas pagal atlikto eksperimentinio tyrimo rezultatus. Pagal susidarantį nuokrypį tarp eksperimentinio tyrimo ir SFD atliekami korekciniai veiksmai, kalibruojant skaičiuojamąjį modelį, tam, kad būtų sumažinta tarpusavio neatitiktis.

Apskaičiuotų ATD rodiklių validumas yra korektiškas, jei gaunamas rezultatas tenkina esminius tvermės dėsnius – kai išlaikomas eksergijos ir entropijos balansų validumas kiekvienu laiko žingsniu ir per visą modeliuojamą periodą. Taip pat yra užtikrinami termodinamikos dėsniai – entropijos gamyba realiuose procesuose visada yra didesnė už 0, kontroliniame tūryje vykstančių procesų efektyvumas yra intervale [0;1]. Šiame darbe, validavimo taisyklės yra integruojamos į skaičiuojamąjį kodą. Rezultatų validumas taip pat gali būti įvertinamas pateikiamų rezultatų grafinėse interpretacijose.

Siekiant užtikrinti rezultatų validumą būtina išlaikyti duomenų nuoseklumą atliekant TA duomenų apdorojimą ir išreiškiant sezoninius rodiklius (TSE, C_i – detaliau 2.3 poskyryje). Agreguojant atskirų laiko žingsnių rezultatus į išvestinius dydžius, būtina užtikrinti, kad integracija būtų korektiška įvardytų validavimo taisyklių atžvilgiu.

Sistemos ir jos komponentų termodinaminis efektyvumas nustatomas pagal fizikinio šilumos mainų ir skysčių mechanikos procesus atspindinčio imitacinio modelio pirminius kintamuosius. Rodikliai gali būti išreiškiami sistemai kaip nedalomam vienetui arba išreiškiami individualiai kiekvienam sistemos komponentui.

Pasinaudojant balanso lygtimis, gali būti apibrėžiami skaičiuojamųjų procedūrų validavimo principai. Masės, energijos, eksergijos ir entropijos balansų išlaikymas yra esminis kriterijus siekiant validaus rezultato.

Masės balanso lygtis yra naudojama energijos ir eksergijos srautams išreikšti atliekant termodinaminę analizę:

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \sum_i \dot{m}_{in} - \sum_e \dot{m}_{out} , \quad (2.6)$$

čia m – masinis debitas.

Įtraukiant į šią (2.6) lygtį energijos kiekį apibūdinančius dydžius, gaunama energijos balanso lygtis:

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_{in} h_{in} - \sum_e \dot{m}_{out} h_{out}, \quad (2.7)$$

čia h – entalpija.

Energijos balanso (2.7) lygtį papildžius dedamosiomis, atspindinčiomis energijos kokybės lygtį, priklausanti nuo atskaitos sąlygų, gaunama eksergijos balanso lygtis:

$$\frac{dEx_{cv}}{dt} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_{in} e_{in} - \sum_e \dot{m}_{out} e_{out} - \sum L, \quad (2.8)$$

čia L – sunaikintos eksergijos kiekis, T – terpės temperatūra

Kur dedamoji e – specifinė eksergija, kuri gali būti išreiškiama kaip:

$$e = (h - h_a) - T_a (s - s_a), \quad (2.9)$$

čia s – entropija.

Supaprastintai, srautiniam procesui, kuris neturi talpumo efektų, eksergijos balanso lygtis gali būti formuluojama tiesiogiai išreiškiant sunaikintos eksergijos kiekį. ATD balanso lygtis gali būti išreikšta įeinančios, išėinančios eksergijos ir ekserginių nuostolių srautais. Įtekančiojo ir ištekančiojo ekserginio srauto skirtumas yra ekserginiai nuostoliai, kurie nurodo darbo sumažėjimą dėl sistemos negrįžtamumo. Jie kiekybiškai išreiškia kokybinę energijos nuvertėjimo (degradacijos) sąvoką (Martinaitis 2007). ATD išraiška arba ekserginis balansas gali būti užrašytas forma, įvertinančia komponento viduje akumuliuotą eksergijos kiekį:

$$\sum \frac{dEx}{dt} + \sum \dot{Ex}_{in} - \sum \dot{Ex}_{out} = \sum L. \quad (2.10)$$

Sąsaja tarp eksergijos ir entropijos yra charakterizuojama pagal Goy-Stodola teoremą (Gouy 1889, Stodola 1905, Lucia 2014):

$$L = T_a S_{gen}. \quad (2.11)$$

Vertinant procesus pagal ATD principus, turi būti tenkinamas entropijos balansas. Šis dydis tiesiogiai išreiškia termodinaminis negrįžtamumus, kurie sukuriama dėl šilumos mainų ir skysčių mechanikos procesų netobulumo nepriklausomai nuo apsupties sąlygų.

$$\frac{dS_{cv}}{dt} = \sum_e \dot{m}_{out} s_{out} - \sum_i \dot{m}_{in} s_{in} + \frac{\dot{Q}}{T_a} + \dot{S}_{gen}. \quad (2.12)$$

Šiomis lygtimis yra apibūžiami procesai pagal PTD ir ATD. Lygtys yra sudarytos iš išvestinių dydžių, kurie gali būti formuojami pasinaudojant pirminiais kintamaisiais – temperatūra, slėgiu, greičiu, chemine koncentracija ir kitais. Tai

atliekama atsižvelgiant į darbinių fluidų charakteristikas – šiluminį laidumą, šiluminę talpą, tankį, dinaminę ir kinematinę klampą, molinę masę ir kitus dydžius.

Atsižvelgiant į tai, kokių potencialų skirtumą įvertina eksergijos ir entropijos dydžiai, eksergija gali būti suskaidoma į atskirus dydžius: mechaninę, šiluminę ir cheminę. Bendroji eksergija gali būti traktuojama kaip šių dėmenų suma:

$$e_{tot} = e_m + e_T + e_{ch}. \quad (2.13)$$

Mechaninė eksergijos pokyčio dedamoji išreiškiama pasitelkiant fluido slėgius, o pokytis išreiškiamas naudojant slėgių skirtumą susidarantį elemente. Tam, kad būtų užtikrintas nuoseklumas tarp sistemos ir komponentų srautų, eksergijos srautas išreiškiamas atsižvelgiant į kontūrą aptarnaujančio slėgtuvo efektyvumą:

$$\Delta Ex_m = \Delta W_{pump} = \left(\dot{m} \cdot \frac{P_{in} - P_{out}}{\rho} \right) \cdot \eta_{pump}^{-1}. \quad (2.14)$$

Šiluminės eksergijos vertė išreiškiama pasitelkiant *Carnot* faktorių, kuris gali būti traktuojamas kaip kokybės faktorius:

$$\eta_{II} = \frac{Q_i}{Ex} = \left(1 - \frac{T_a}{T_i} \right). \quad (2.15)$$

Šiluminė eksergija taip pat gali būti išreiškiama pasinaudojant savitąja eksergija arba koentalpija, kurios formuluotėje (2.9 formulė) naudojami entalpijos ir entropijos dydžiai susiejami su pirminiais temperatūros kintamaisiais šiomis matematinėmis išraiškomis:

$$h_f = c_f T_f; \quad (2.16)$$

$$s_f = c_f \ln \frac{T_f}{273,15}. \quad (2.17)$$

Pasinaudojant šiais teoriniais pagrindais, tolesniuose darbo skyriuose formuojami skaičiuojamieji modeliai ir efektyvumo vertinimo išraiškos, apibrėžiančios sistemos, posistemų, komponentų ar jų grupės efektyvumą pagal abu termodinamikos dėsnius.

Termodinaminis efektyvumas nepriklausomai nuo sistemos dekompozicijos ir laiko skalės suvokiamas kaip sukurto produkto ir atiduotų srautų arba gautų ir sunaudotų srautų santykis. Pateikiamos skirtingos termodinaminio efektyvumo formuluotės žinomos kaip universalūs (2.18 formulė) ir funkcinis (2.19 formulė) efektyvumai. Priklausomai nuo komponento ribas kertančių srautų kiekio, šie efektyvumai gali būti tapatūs arba skirtis. Bendroju atveju šie rodikliai yra apibrėžiami tokiomis išraiškomis:

$$\eta_{universal} = \frac{\sum_k^{n=k} Ex_{out}}{\sum_k^{n=k} Ex_{in}} = 1 - \frac{\sum_k^{n=k} L}{\sum_k^{n=1} Ex_{in}}. \quad (2.18)$$

Funkcinis termodinaminis efektyvumas:

$$\eta_{functional} = \frac{\sum_k^{n=k} Ex_{produced}}{\sum_k^{n=k} Ex_{consumed}} = 1 - \frac{\sum_k^{n=k} L}{\sum_k^{n=k} Ex_{consumed}} \quad (2.19)$$

Arti apsupties temperatūros vykstantys procesai, esant kintančiai apsupties temperatūrai, turėtų būti nagrinėjami be apribojimų – nepriklausomai nuo srautų parametrų ir apsupties temperatūros padėties. Specialiais atvejais turi būti taikomi adaptuoti skaičiavimo metodai tam, kad būtų gaunamas korektiškas rezultatas, išlaikantis antrojo termodinamikos dėsnio principus – termodinaminis efektyvumas privalo išlikti intervale tarp 0 ir 1 tam kad būtų tenkinami šie ai:

1. Idealaus, termodinamiškai grįžtamo proceso atveju sunaikintos eksergijos kiekis yra lygus 0 ir negali būti neigiamas.
2. Realaus proceso atveju sunaikintos eksergijos kiekis visada >0 dėl tarpusavyje konkuruojančių šilumos mainų ir skysčių mechanikos procesų.

Skaičiavimo procedūros, tenkinančios šiuos principus, gali būti laikomos validžiomis ir korektiškomis pagal klasikinę termodinamikos teoriją. Šių taisyklių išlaikymas užtikrina korektišką sezoninio efektyvumo rezultato išreiškimą.

2.2.2. Generavimo ir energetinių paslaugų kokybinių poreikių apibrėžimas

Energinių paslaugų teikimui reikalingi ekserginiai srautai gali būti išreikšiami minimaliu energijos kiekiu, reikalingu užtikrinti energetinės paslaugos funkciją. Siekiant išreikšti sistemos arba grandinės (teikiančios energetinę paslaugą) kokybinį arba termodinaminį efektyvumą, reikalinga suformuoti energetinės paslaugos poreikių konversiją į eksergijos srautus, kurie atspindi energetinei paslaugai reikalingą energijos kokybės lygį.

Energijos kiekis yra išreiškiamas pagal energijos balanso lygtį (išlaikant energijos tvermės dėsnį). Šis principas yra svarbus dėl sąsajos su ATD naudojamomis balanso lygtimis. Matematinės energetinių paslaugų srautų

formuluotės pateikiamos *F priede*. Termohidrodinaminių kontūrų sistemų teikiamos energetinės paslaugos:

1. Pastato patalpų šildymas.
2. Pastato patalpų vėsinimas (virš apsuptys, žemiau apsuptys sąlygų).
3. Patalpų vėdinimas (atgaunant šalinamo oro šilumą).
4. Tiekiamo oro vėsinimas (nekeičiant absoliutinės drėgmės, sausinant orą).
5. Tiekiamo oro drėkinimas.
6. Karšto vandens ruošimas.

Šie rodikliai gali būti apskaičiuojami kiekvienu laiko žingsniu arba žingsnių rinkiniui, kuris turi tas pačias kraštines sąlygas, naudojamas skaičiavimuose. Pasitelkiant šiuos rodiklius, išreiškiamas minimalus eksergijos kiekis, reikalingas užtikrinti energinių paslaugų funkcijas.

Rodiklių apskaičiavimo procedūros, gali būti tiesiogiai integruojamos į dinaminio modeliavimo programas, leidžiančias vartotojui įterpti savo kodą (Energy+ ir kitos atviro kodo programos) arba formuoti papildomas išvesties duomenų apdorojimo procedūras (IES VE, TRNSYS ir kitos). Tokiu būdu sudarant galimybę išreikšti energinių paslaugų vartotojui reikalingą kokybės lygmenį ir kaip atskaitos tašką ekserginio efektyvumo skaičiavimo procedūroms.

Šiame darbe suformuoti programinio kodo fragmentai, integruojantys duomenų apdorojimo procedūras IES VE, TRNSYS ir MATLAB programinėse aplinkose.

Į sistemą patenkantys eksergijos srautai apskaičiuojami pagal srauto tipą ir jo termodinaminę temperatūrą. Šiame darbe apžvelgiamų energijos srautų kilmė gali būti:

1. Eksergija, suvartojama slėgtuvuose.
2. Saulės eksergija, absorbuojama saulės kolektoriuose.
3. Eksergija, išsiskirianti deginant kurą.
4. Eksergija, išgaunama iš geologinės stovymės.
5. Eksergija, išgaunama iš aplinkos oro.
6. Eksergija iš šiluminę energiją transformavusių įrenginių (2–5 punktuose), perduodama šilumnešio srautui.

Šios energijos srautų konversijos procedūros leidžia išreikšti energijos kokybės faktorių, kuris parodo, kiek eksergijos (išgaunamo termodinaminio darbo) yra energijos sraute. Matematinės srautų išraiškos pateikiamos *G priede*.

Specifiniais sistemų funkcionavimo periodais šios formuluotės nėra tinkamos. Dėl gautų rezultatų neatitikimo eksergijos arba entropijos balanso lygtims, nėra išlaikomas išraiškų validumas. Šie išimtiniai atvejai yra charakteringa matematinių išraiškų elgsena, kai proceso temperatūros atsiranda arti arba kertasi su apsuptys temperatūra. Atvejai, kuriais galimi tokie proceso rodikliai yra nagrinėjami atskirai (Martinaitis ir Strekenė 2017). Atvejais, kuriais

nėra įvardijama proceso ir apsupties rodiklių sankirta, iškreipianti šių rodiklių korektiškumą, taikomos matematinės kokybės išraiškos, aprašytos šiame darbo poskyryje.

2.2.3. Nestandartiniai termodinaminio efektyvumo atvejai

Siekiant nuoseklaus sezoninio termodinaminio efektyvumo įvertinimo, atskirų laiko žingsnių termodinaminis efektyvumas privalo tenkinti fundamentalius termodinamikos principus nepriklausomai nuo apsupties sąlygų. Dėl naudojamų matematinių aproksimacijų entropijos pokyčio įvertinimui, sistemos elementų, kurių terpės temperatūra, modeliavimo periodu varijuodama atsiduria virš, tarp ir po apsupties temperatūra, gali netenkinti esminių principų. Tokių atvejų atsiradimas iškreipia sezoninį efektyvumą ir sumažina šio rodiklio objektyvumą termodinaminio požiūriu. Dėl šios priežasties elementams, kurie tipinėmis funkcionavimo sąlygomis gali patekti į nekorektiškai interpretuojamą intervalą, darbe yra pateikiami galimi momentinio termodinaminio efektyvumo skaičiavimo metodai, išlaikantys termodinaminis dėsnius.

- Dviejų srautų šilumokaitis su vienodais srautais esant kintančiai apsupties temperatūrai: sprendimo atvejai pateikiami šilumos mainų įrenginiams, kurių šilto ir šalto srauto masinio debito ir šiluminės talpos produktai yra tapatus ($Cr = 1$).
- Šilumokaitis su viena pastovia kraštine sąlyga: kitas kraštutinis atvejis, kai vienos iš srautų temperatūros išlieka nepakitusios ($Cr = 0$) – taikoma prielaida, kad nekintanti temperatūra yra didelės šiluminės talpos (kuri artėja į begalybę) pasekmė. Šiam atvejui pateikiamas alternatyvus sprendimo metodas pasinaudojant šilumos srauto kokybę išreiškiančių *Carnot* faktoriumi.
- Dviejų srautų šilumokaitis su skirtingais srautais esant kintančiai apsupties temperatūrai: taip pat pateikiamas sprendimo atvejis tarpiniam atvejui ($0 < Cr < 1$).

Išskirtinis termodinaminės analizės atvejis susidaro tada, kai siekiama įvertinti akumuliacinės talpos momentinius termodinaminis rodiklius. Šio darbo kontekste sudarytas akumuliacinio proceso kintant apsupties temperatūrai analizės metodas. Šiuo būdu, priklausomai nuo funkcionavimo režimo, išreiškiamas komponento momentinis termodinaminis efektyvumas.

Detalesnės metodikos įvardytiems atvejams pateikiami B priede.

2.2.4. Termodinaminės analizės metodų integracija modeliavimo detalume

Nuo sistemos išskaidymo priklauso imitacinio modeliavimo proceso gaunamų duomenų (rezultatų) kiekis. Skirtingiems analizės tipams reikalingas specifinis detalumo lygis, todėl atliekamos analizės detalumas diktuoja minimalų sistemos dekompozicijos lygmenį. Mažesnio detalumo reikalaujančios analizės metodai gali būti taikomi, jei simuliacija buvo atlikta didesniu detalumu – informacija daugeliu atveju gali būti agreguojama taip, kad būtų tinkama pasirinktam analizės tipui.

Lentelėje (2.1) pateikiama klasifikacija, apibendrinanti sistemos dekompozicijos ir termodinaminės analizės metodų suderinamumą. Pateikiama klasifikacija sudaryta pagal literatūros analizėje identifikuotas tendencijas ir pateikiamas metodikas, kuriose yra nustatytas reikalingas informacijos kiekis, geometrinis ir pirminių kintamųjų dimensijų kiekis.

2.1 lentelė. Metodų ir detalumo lygių suderinamumas

Table 2.1. Combination capabilities of methods and detailness levels

Sistemos dekompozicijos lygmuo	Taikymui tinkamas metodas				
	Tradicinė termodinaminė analizė	Termodinaminis sezoninis efektyvumas	Išplėstinė termodinaminė analizė	Entropijos generavimo minimizavimas	Lokalaus entropijos generavimo analizė
Sistema					
Posistemiai					
Komponentų grupė					
Komponentai					
Vidinė konfigūracija					

Visų analizės metodų bendrasis bruožas – atliekami veiksmai siekiant sistemos arba jos dedamųjų efektyvumo, naudingumo atliekant tiesioginę funkciją gerinimas – maksimalizuojant funkciją arba mažinant vykdymo sąnaudas.

Siekiant šio tikslo, gali būti pasirenkami skirtingi metodai ir būdai, kuriuos galima klasifikuoti į tris esmines metodų grupes.

Dalis termodinaminės analizės metodų tiesiogiai naudojasi šilumos mainų ir skysčių dinamikos imitacinio modeliavimo procesų rezultatais juos apdorojant po skaičiuojamųjų procedūrų atlikimo (angl. *post-processing*).

Analizės metodai, kurie reikalauja papildomų skaičiuojamųjų operacijų ir neapsiriboja skaičiavimo rezultatų (pirminių kintamųjų) apdorojimu, turi būti išskiriami iš analizės metodų aibės. Išskirtina metodų grupė, kuri naudojasi ATD pagrindu apskaičiuotais dydžiais kaip optimizavimo rodikliais.

Dėl skirtinguose dekompozicijos lygiuose prieinamų modeliavimo metodų generuojamas informacijos kiekis yra skirtingas. Jeigu termodinaminės analizės metodai yra vertinami kaip duomenų apdorojimo procedūros (kurioms reikalinga specifinė informacija), ne visuose dekompozicijos lygiuose generuojama informacija yra pakankama konkreitiems analizės metodams atlikti.

Atsižvelgiant į šį apribojimą, nagrinėjamos sistemos dekompozicijos lygis turi būti pasirenkamas atsižvelgiant į reikalingą atlikti analizės metodą.

2.3. Termodinaminis sezoninis sistemos efektyvumas

Termodinaminis sistemos efektyvumas per sezoną nuolat kinta. Šis pokytis atsiranda dėl apsupties sąlygų kaitos ir sistemos generuojamų termodinaminių negrįžtamųjų (entropijos generavimo) pokyčio, priklausančio nuo sistemos funkcinės apkrovos ir susietųjų šilumos mainų–skysčių mechanikos procesų.

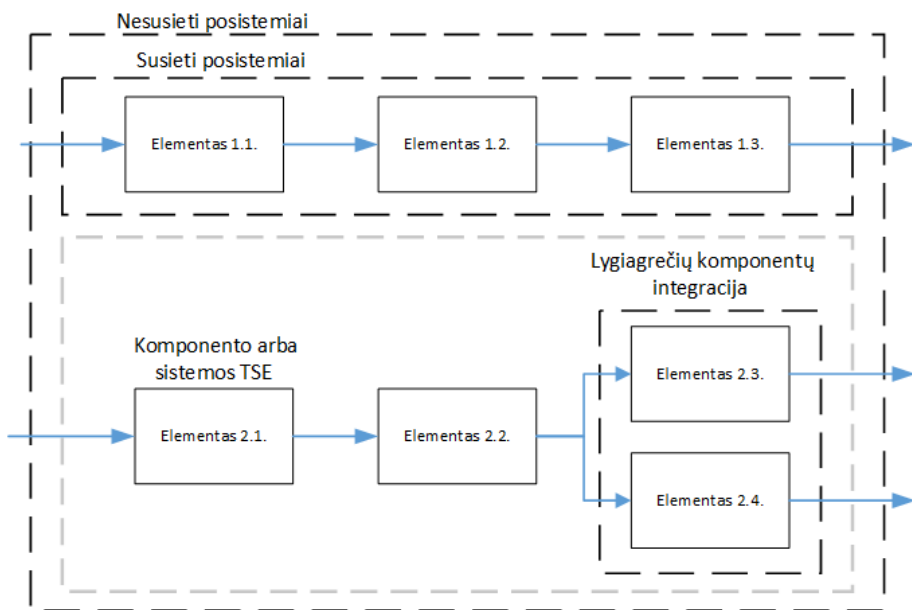
Sistemos efektyvumas gali būti išreiškiamas sistemos kontroliniam tūriui. Atskiroms sistemos dedamosioms, kurios yra tarpusavyje susietos arba nesusietos, efektyvumas gali būti išreikštas darbe pateikiamais metodais. Galimų situacijų schema pateikiama paveiksle (2.9 pav.). Detalesnė metodų taikymo eiga pateikiama šio poskyrio skirsniuose.

Termodinaminis Sezoninis Efektyvumas (TSE) šio darbo ribose suprantamas kaip eksergijos srautų santykis – įeinančių ir paliekančių sistemos kontrolinį tūrį per visą nagrinėjamą periodą (sezoną). Pasitelkiant šį rodiklį, galima kiekybiškai išreikšti energijos kokybės nuostolius, tobulinimo potencialą siekiant tvariau išnaudoti resursus ir tarpusavyje lyginti svarstomas alternatyvas.

Sistemos efektyvumą sezono metu charakterizuojantis termodinaminis efektyvumas (TSE), apibūdinantis bendrąjį pagamintos produkcijos ir sunaudotų resursų santykį, gali būti išreikštas kaip įeinančių ir išėinančių srautų suma per visus nagrinėjamo periodo laiko žingsnius.

$$TSE = \frac{\sum_{i=0}^n (Ex_{out.i})}{\sum_{i=0}^n (Ex_{in.i})}. \quad (2.20)$$

Tačiau išraiška, pateikiama tokia forma, nėra informatyvi. Analitikui, siekiančiam identifikuoti kritinius periodus ir identifikuoti, kuriais laiko žingsniais yra reikalinga nuodugnesnė analizė, yra reikalinga detalesnė informacija. Dėl šios priežasties tradicinė efektyvumo išraiška buvo transformuota į atskirų laiko žingsnių sukuriamo poveikio sumą.



2.9 pav. Termodinaminio sezoninio efektyvumo atvejų santrauka
Fig. 2.9. Summary of thermodynamic seasonal efficeincy cases

Formuojant platesnę sezoninio efektyvumo išraišką, sudaroma galimybė naudoti momentinius (konkretaus laiko žingsnio) termodinامينius efektyvumus. Platesnė išraiška gali būti formuluojama taip:

$$TSE = \frac{\sum_{i=0}^n (Ex_{out.i})}{\sum_{i=0}^n (Ex_{in.i})} = \frac{\sum_{i=0}^n (Ex_{out.i} \cdot g_i)}{\sum_{i=0}^n (Ex_{in.i} \cdot g_i)} = \sum_{i=0}^n (\eta_{i.k} \cdot C_{i.k}). \quad (2.21)$$

Tokiu būdu koreguojantis narys C_i yra išreiškiamas pasinaudojant atsikartojamumo faktoriumi g_i :

$$C_i = \frac{Ex_{in.1} \cdot g_i}{\sum_{i=0}^n (Ex_{in..i} \cdot g_i)} . \quad (2.22)$$

Atskyrus korekcinio rodiklio išraišką laiko žingsniui ir sudarius visų laiko žingsnių rodiklius, gaunamas įtekančių srautų sumos santykis per visą skaičiavimo periodą. Siekiant išlaikyti korektiškumą, būtina užtikrinti sąlygą:

$$\sum C_i = \sum \left(\frac{Ex_{in-i} \cdot g_i}{\sum (Ex_{in} \cdot g)} \right) \equiv 1 . \quad (2.23)$$

Formulių išvedimas ir pagrindimas pateikiamas C priede.

Svarbu, kad atskiruose laiko žingsniuose būtų užtikrintas termodinaminių balanso lygčių korektiškumas. Pateikiama metodika sukuria papildomą dydį – laiko žingsnio svorio faktorių, padedantį analizuoti sezoninio efektyvumo dedamąsias, tiesiogiai išreikšti laiko žingsnio svorį.

Pateiktas metodas gali būti taikomas apdorojant ne tik dinaminio modeliavimo rezultatus, tačiau ir supaprastintuose metoduose. Jei nagrinėjamas laikotarpis suskaidomas į periodus, kurių metu kraštinės sąlygos išlieka pastovios, g_i gali įgauti reikšmę, iliustruojančią šio periodo trukmę. Tokiu atveju šių sąlygų trukmė gali būti išreiškiama dažnių skirstiniu, kuris išreiškia specifinių sąlygų trukmę. Kiekvienų sąlygų g_i trukmė leidžia sumažinti skaičiuojamųjų procedūrų kiekį atliekant skaičiuojamuosius veiksmus esant vienoms kraštinėms sąlygoms ir išreiškiant srautus kaip momentinio kiekio ir trukmės produktą. Tokiu atveju sezoninis termodinaminis efektyvumas išreiškiamas prilyginant g vertės atsikartojančių sąlygų trukmei.

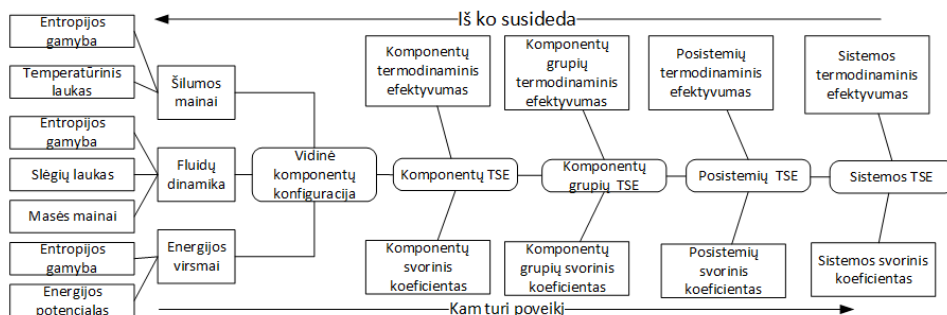
Taikant šį metodą, validavimo galimybės yra kur kas paprastesnės, nes naudojama formuluotė leidžia izoliuoti atskirų laiko žingsnių sprendinius ir juos nagrinėti atskirai. Tokiu būdu sudaroma galimybė identifikuoti skaičiavimo procedūrų metu atsirandančius nuokrypius. Priešingai nei tradicinės išraiškos atveju, efektyvumo rodikliai, apskaičiuoti esant konkrečioms kraštinėms sąlygoms, yra matomi analizę atliekančiam analitikui ir gali būti greitai identifikuojami vizualios pateikties formoje arba programiniu kodu.

2.3.1. Termodinaminio sezoninio efektyvumo dekompozicija

Remiantis sistemų teorija (Blumberga et.al. 2011) ir TRIZ 9–ekranų (langu) (Altshuller 1984) principais, galima teigti, kad sistemos gali būti dekomponuotos į atskirus posistemius, kurie yra sudaryti iš mažesnių dedamųjų (posistemų, komponentų grupių, atskirų elementų ir komponentų). Tokiu būdu visos sistemos

sukuriamas rezultatas priklauso nuo jos atskirų dedamųjų rezultatyvumo ir produktyvumo. Remiantis šiuo principu, galima formuoti analogišką perspektyvą, teigiančią, kad sistemos efektyvumas priklauso nuo ją sudarančių mažesnių dedamųjų. Grafinė šio principo interpretacija pateikiama 2.10 pav.

Svarbu pabrėžti, kad ryšių tarp skirtingų detalumo lygmenų supratimas ir vidinės lygmens struktūros supratimas leidžia nustatyti ir klasifikuoti komponentų poveikį galutiniam sistemos TSE rodikliui.



2.10 pav. Sistemos termodinaminio sezoninio efektyvumo rodiklio struktūra
Fig. 2.10. The structure of system thermodynamic seasonal efficiency parameter

Analizuojant šią sąsają tarp atskirų sistemos dekompozicijos lygių ir atsižvelgiant į sistemų sąveikos specifiką, šie ryšiai gali būti suskaidyti į nepriklausomus ir susietuosius. Tarpusavyje nepriklausomos sistemos dedamosios gali būti suprantamos kaip posistemiai, transformuojantys ir pernešantys atskirus energijos srautus. Šių dedamųjų efektyvumo pokytis neturi poveikio kitiems posistemiams. Tarpusavyje susietos sistemos dedamosios gali būti suprantamos kaip tos pačios energinės paslaugos tiekimo grandinė aptarnaujančios dedamosios. Tarpusavyje nesusietų posistemių efektyvumo poveikis jų sudaromai sistemai gali būti išreiškiamas pagal sunaikintos eksergijos kiekį.

2.3.2. Nesusietų ir susietų posistemių poveikis sistemos efektyvumui

Siekiant integruoti atskirų, tarpusavyje nesusijusių posistemių (arba komponentų) termodinaminius efektyvumus į aukštesnio lygio sistemos efektyvumą, sistemos efektyvumo išraiška gali būti išskleidžiama tokia forma (2.24 formulė). Pateikiamoje išraiškoje yra išskiriamas atskirų posistemių efektyvumas ir korekcinis faktorius, kuriuo sistemos efektyvumas yra išreiškiamas kaip korekcinų koeficientų produktų suma.

$$\eta_{sist} = \frac{\sum (Ex_{out})_{sist.tot}}{\sum (Ex_{in})_{sist.tot}} = \sum \left(\frac{\sum (Ex_{in})_i}{\underbrace{\sum (Ex_{in})_{sist.tot}}_{B_i}} \cdot \frac{\sum (Ex_{out})_i}{\underbrace{\sum (Ex_{in})_i}_{\eta_i}} \right). \quad (2.24)$$

Korekcinis koeficientas, apibrėžiantis kiekvieno posistemo turimo poveikio svorį sistemai yra išreiškiamas taip:

$$B_i = \frac{\sum (Ex_{in})_i}{\sum (Ex_{in})_{sist.tot}}. \quad (2.25)$$

Pasinaudojant sistemoje esančių posistemių efektyvumo svorio koeficientu B, apskaičiuojamų dedamųjų suma yra tapati sistemos efektyvumui.

$$\eta_{sist} = \sum (B_i \cdot \eta_i). \quad (2.26)$$

Šių narių suma, išreiškianti visų sistemos dėmenų sukuriamą poveikį, turi būti tapati sistemos tobulinimo potencialui. Visų svorio koeficientų B suma privalo būti lygi 1.

Pasinaudojant svorio faktoriumi B, atskirų, tarpusavyje nesusijusių posistemių efektyvumai gali būti integruojami į sistemos efektyvumo išraišką. Atliekant šias integracijos procedūras kiekvienu laiko žingsniu, gaunamas sistemos efektyvumas ir identifikuojamas posistemių poveikis sistemos efektyvumui.

Tarpusavyje susietų dedamųjų poveikis visos sistemos efektyvumui, gali būti išreikštas pasinaudojant elementų grandinės integracijos išraiška. Tokiu būdu įvertinant kiekvieno grandinėje esančio komponento efektyvumo poveikį grandinei. Darinys, susidedantis iš atskirų elementų gali būti apibūdintas kaip sistema, kurios elementų sukuriamų poveikių ir efektyvumo rodiklių suma yra tapati arba mažesnė už sistemos sukuriamą poveikį. Tam, kad būtų galima nuosekliau suprasti sistemos efektyvumo kilmę, tikslinga nagrinėti TSE rodikliui poveikį turinčius atskirų laiko žingsnių efektyvumus. Šis aspektas nėra pakankamai išplėtotas vertinant termodinaminį sezoninį efektyvumą. Pateikiamas sistemos sezoninio efektyvumo apibrėžimas, kai integruojamas atskirų elementų termodinaminis efektyvumas.

Sistemos momentinis efektyvumas, jei komponentai funkcionuoja grandinėje ir neturi pašalinių srautų, gali būti išreiškiamas 2.27 formulėje.

$$\eta_{sis} = \frac{Ex_{out.sis}}{Ex_{in.sis}} = \frac{Ex_{out..i}}{Ex_{in..i}} \cdot \dots \cdot \frac{Ex_{out..i}}{Ex_{in..i}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \dots \cdot \eta_k. \quad (2.27)$$

Tokiu atveju sistemos ekserginis efektyvumas gali būti išreikštas kaip atskirų komponentų sezoninių efektyvumų sandauga:

$$TSE = \frac{\sum_{i=0}^n (Ex_{out..i})_{sis}}{\sum_{i=0}^n (Ex_{in..i})_{sis}} = \sum_{i=0}^n (\eta_{i,k} \cdot C_{i,k}) \cdot \dots \cdot \sum_{i=0}^n (\eta_{i,k} \cdot C_{i,k}). \quad (2.28)$$

Jeigu komponentai funkcionavimo metu gauna eksergijos srautus ne tik iš prieš jį esančio komponento, bet ir papildomą eksergijos srautą, reikalingą jam funkcionuoti, ši išraiška negalioja ir siekiant naudotis grandinės narių efektyvumo sandauga reikalinga pritaikyti papildomus pataisos koeficientus.

Išskaidžius į komponentą įeinančius srautus į „esminius“ ir „pagalbinius“, efektyvumo išraiška visos sistemos ribose išreiškiama pritaikius pataisos koeficientus. Pritaikius šiuos koeficientus, sistemos efektyvumas gali būti išreiškiamas kaip atskirų elementų universalių efektyvumų ir pataisos koeficientų „A“ sandauga:

$$\eta_{sis} = \frac{Ex_{out..i}}{Ex_{in..i} + \sum_{n=m}^{n=1} Ex_{in.add}} = (\eta_{un.1} \cdot A_1) \cdot \dots \cdot (\eta_{un.k} \cdot A_k). \quad (2.29)$$

Bendruoju atveju, koeficientas A , k -tajam elementui gali būti išreiškiamas kaip:

$$A_k = \frac{\left[\frac{Ex_{in.k} + Ex_{in.add.k}}{Ex_{in.k}} \right]}{\left[\frac{Ex_{in.sis} + \sum_{n=k}^{n=1} (Ex_{in.add})}{Ex_{in.sis}} \right]^{\frac{1}{n}}}. \quad (2.30)$$

Pritaikius šias pataisas, sistemos sezoninis efektyvumas pasinaudojant atskirų elementų universalios efektyvumo išraiškomis, pateikiamas 2.31 formulėje.

$$TSE = \frac{\sum_{i=0}^n (Ex_{out..i})_{sis}}{\sum_{i=0}^n (Ex_{in..i})_{sis} + \sum_{i=0}^n (Ex_{in.add})_{sis}} = \sum_{i=0}^n (\eta_{i.k} \cdot C_{i.k} \cdot A_{i.k}) \cdot \dots \cdot \sum_{i=0}^n (\eta_{i.k} \cdot C_{i.k} \cdot A_{i.k}). \quad (2.31)$$

Formulių išvedimas ir pagrindimas pateikiamas D priede.

2.3.3. Lygiagrečių komponentų integracija į nuoseklą grandinę

Dėl sistemų formavimo specifikos, dedamosios, sudarančios grandinę, gali būti išdėstytos lygiagrečiai ir nuosekliai. Grandinės efektyvumo integracijos pavyzdys iliustruoja nuoseklaus elementų išdėstymo atvejį. Lygiagretaus komponentų išdėstymo atveju, integracija į bendrą sistemos efektyvinimo išraišką yra galima taikant lygiagrečių elementų poveikio transformavimą, formuojant nuoseklų elementų grandinę.

Nuosekliai išsidėsčiusių komponentų poveikis yra tapatus šių sandaugai. Esant elementų grandinę papildantiems srautams, reikalingi papildomi korekcijos faktoriai, užtikrinantys matematinių išraiškų korektiškumą ir tokiu būdu išreiškiantys atskirų elementų nuokrypį nuo idealaus elementų efektyvumo sandaugos atvejo.

Esant lygiagrečiai išsidėsčiusiems sistemos elementams, kurie atlieka tą pačią funkciją, atskirų elementų efektyvumo integracija į grandinės ir grandinių sistemos efektyvumą nėra galima be korekcinių veiksmų.

Supaprastinant lygiagrečius sistemos elementus iki atstojamojo elemento, šio momentinis efektyvumas apibūdinamas:

$$\eta_{eqv} = \sum (\eta_i \cdot f_{parallel_i}). \quad (2.32)$$

Kiekvienam elemento efektyvumui pritaikomas korekcijos koeficientas, išreiškiamas kaip:

$$f_{parallel_i} = \frac{Ex_{in_i}}{\sum (Ex_{in_k})}. \quad (2.33)$$

Siekiant užtikrinti išraiškos korektiškumą, svarbu užtikrinti sąlygą:

$$\sum (f_{parallel}) = 1. \quad (2.34)$$

Tokios procedūros korektiškumas gali būti patikrinamas palyginant atskirų elementų, išeinančių ir įeinančių, santykį:

$$\eta_{eqv} = \sum (\eta_i \cdot f_{parallel_i}) = \frac{\sum (Ex_{out_k})}{\sum (Ex_{in_k})}. \quad (2.35)$$

Jei lygiagrečius elementus pasiekia papildomi eksergijos srautai:

$$\eta_{eqv} = \sum (\eta_i \cdot f_{parallel_i}) = \frac{\sum (Ex_{out_k})}{\sum (Ex_{in_k}) + \sum (Ex_{in_aux_k})}. \quad (2.36)$$

Pasinaudojant šia išraiška, lygiagretūs srautai yra transformuojami į vieną atstojamąjį srautą, kuris toliau naudojamas energinių paslaugų grandinės analizei.

2.3.4. Termodinaminio sezoninio efektyvumo rodiklio etalonai ir atskaitos sistema

Siekiant įvertinti sistemos ar energinių paslaugų tiekimo grandinės termodinaminį sezoninį efektyvumą (TSE), reikalinga turėti atskaitines sistemas, kurių atžvilgiu įvertinamas konkretus konfigūracijos atvejis. Ši atskaitos sistema formuojama pasitelkiant blogiausias ir aukštą termodinaminį efektyvumą užtikrinančias sistemų konfigūracijas. Esminiai principai, kuriais remiantis formuojamos prielaidos kiekvienai energinių paslaugų tiekimo posistemiiui, iš kurių susideda pastatą aptarnaujanti sistema, pateikiami 2.2 lentelėje.

Dėl stiprios energijos poreikių ir pastato charakteristikų sąsajos, kiekvienas pastatas, vartojantis energiją gali turėti skirtingas blogiausio ir aukšto efektyvumo etalonų reikšmes. Dėl šios priežasties pastato projektiniai sprendimai, atliepiantys komfortą ir energines paslaugas užtikrinančių sistemų efektyvumą, gali būti veikiami ne tik koreguojant sistemų konfigūraciją, funkcionavimo parametrus ir kitus rodiklius, keičiančius vidinių termodinaminių negrįžtamumų atsiradimą.

Pastato atitvarų charakteristikos, forma, orientacija, įstiklinimo kiekis bei charakteristikos kartu su kitais parametrais turi didelį poveikį pastato energijos ir eksergijos poreikiams.

2.2 lentelė. Esminės ribinių etalonų charakteristikos**Table 2.2.** The main characteristics of benchmark

Funkcija	Blogiausio efektyvumo etalonas	Aukšto efektyvumo etalonas
Patalpų šildymas šaltuoju metų laiku	Patalpų šildymo atveju reikalinga energija yra tiesiogiai tapatinama su termodinaminiu darbu – šilumos generavimui naudojant elektros energiją. $Q_h = E$	Šilumos šaltinis, kurio atiduodamo šilumos srauto temperatūra priklauso nuo reikalingos galios. Patalpose – paviršinis, žematemperatūrinis šildymo būdas. Visoms aptarnaujamoms zonoms reikalingas tos pačios temperatūros šilumnešis.
Patalpų vėsinimas šiltuoju metų laiku	Žemo efektyvumo vėsinimo įrenginys ($EER=2.8$), aušinantis vandenį, cirkuliacinių siurblių suvartojimas. $Q_c/n = E$	Vėsos šaltinis, kurio šilumnešio temperatūra apskaičiuojama priklausomai nuo reikalingos vėsinimo galios. Patalpose – aukštatemperatūrinis vėsinimas. Cirkuliaciniai siurbliai – aukšto efektyvumo pagal ES apibrėžimą.
Patalpų vėdinimas šaltuoju metų laiku	Tiekiamas oras pašildomas minimalaus privalomo efektyvumo šilumogrąža (65%) ir iki reikalingos temperatūros pašildoma elektriniu šildytuvu. $Q_h = E$	Tiekiamas oras pašildomas šilumogrąža. Iki reikiamos temperatūros oras pašildomas šilumnešio, kurio temperatūra apskaičiuojama priklausomai nuo reikalingos galios.
Patalpų vėdinimas šiltuoju metų laiku	Tiekiamas oras ataušinamas taikant principus, naudojamus patalpų vėsinimo atveju.	Naudojamas šilumos atgavimas ir oras ataušinamas aukštatemperatūrinio vėsos šaltinio.
Karštas vanduo	Karšto vandens ruošimui naudojama elektros energija. $Q_h = E$	Karštą vandenį ruošiantis šaltinis gamina 5 K aukštesnės temperatūros šilumnešį karšto vandens ruošimui.

2.4. Realus tobulinimo potencialas

Atliekant termodinaminę analizę, proceso efektyvumo išraiška apibrėžia funkcijai atlikti reikalingą resursų kiekį atsižvelgiant į proceso metu patiriamų nuostolių kiekį. Teorinis idealus procesas, vykstantis be nuostolių ir apibrėžiamas kaip termodinamiškai grįžtamas, yra atskaitos taškas, su kuriuo lyginami procesai. Efektyvumo skirtumas tarp idealaus ir realaus proceso yra įvardijamas kaip tobulinimo potencialas (Van Gool 1997), kuris turi tiesioginę priklausomybę nuo sistemos patiriamų nuostolių.

$$IP = 1 - \eta_{II} = \frac{Ex_{in} - Ex_{out}}{Ex_{in}} = \frac{L}{Ex_{in}} = \frac{T_a S_{gen}}{Ex_{in}}. \quad (2.37)$$

Šiuo dydžiu gali būti išreiškiamas didžiausias galimas sistemos ar jos komponento patobulinimas, ribojantis jo funkcionavimą nuo idealiai grįžtamo proceso.

Sistemos arba jos komponentuose atsirandantis sunaikintos eksergijos kiekis gali būti išskaidytas į neišvengiamų (angl. *Unavoidable*) ir išvengiamų (angl. *Avoidable*) eksergijos nuostolių komponentes:

$$L_{tot} = L^{UN} + L^{AV}. \quad (2.38)$$

Neišvengiami eksergijos nuostoliai pagal Tstatsaronis (2001) gali būti įvardijami kaip visais atvejais įvykstantis negrįžtamumų atsiradimas tol, kol komponentas naudojamas sistemoje. Šis dydis negali būti sumažintas dėl technologinių apribojimų. Kitų autorių, taikančių išplėstinės termodinaminės analizės metodą (Kelly et.al. 2009), šis dydis gaunamas panaudojant geriausią termodinaminį efektyvumą turintį komponentą.

Sutapatinus neišvengiamus eksergijos nuostolius su minimaliu pagamintos entropijos kiekiu komponente, kuris priklausomai nuo proceso tipo, geometrijos ir kitų veiksnių, gali būti apibūdinamas kaip pagamintos entropijos kiekio funkcijos minimumas (Bejan 1996). Tokiu atveju eksergijos nuostolių išskaidymas gali būti realizuotas pasitelkiant Gouy-Stodola teoremą:

$$L^{UN} = T_a \cdot S_{gen.min}; \quad (2.39)$$

$$L^{AV} = L - T_a \cdot S_{gen.min}. \quad (2.40)$$

Pritaikius prieinamus aukšto termodinaminio efektyvumo komponentus ir nustačius fluido tėkmės parametrus, tenkinančius $S_{gen.min}$ sąlygą – šiomis išraiškomis galima aptikti globalų neišvengiamų eksergijos nuostolių minimumą.

Termodinaminis efektyvumas, kintantis nuo 0 iki 1 apibrėžia procesus nuo visiško energijos kokybės sunaikinimo ($Ex_{in} = T_a \cdot S_{gen}$) iki idealaus, termodinamiškai grįžtamo proceso kurio metu nėra energijos kokybės nuostolio ($S_{gen} = 0$, $Ex_{in} = Ex_{out}$). Realūs procesai nepriklausomai nuo specifikos bei kraštinių sąlygų turi faktinį termodinaminį efektyvumą šiame intervale. Realiai

vykstantys susietieji šilumos mainų ir skysčių mechanikos procesai negali pasiekti idealaus proceso ribos dėl vykstančių devaluacijos (trinties) reiškinių. Dėl šios priežasties egzistuoja faktinė efektyvumo riba, išplėstinės termodinaminės analizės metodo įvardijama kaip neišvengiami eksergijos nuostoliai, o entropijos generavimo analizės – entropijos generavimo minimumas. Pasitelkiant šią ribą, išreiškiamas ribinis efektyvumas, kurį sistema arba komponentas gali pasiekti.

Pasinaudojant šiomis formulėmis, galima pasiūlyti realaus tobulinimo potencialo dydį, kuris išreiškia skirtumą tarp didžiausio galimo ir faktinio sistemos funkcionavimo efektyvumo esant fiksuotai sistemos konfigūracijai

$$IP_R = \eta_{\max} - \eta_{act} . \quad (2.41)$$

Jeigu sistema funkcionuoja sąlygomis, kai pagamintos entropijos kiekis lygus minimumui ir išvengiamų termodinaminių nuostolių kiekis yra lygus 0, tada:

$$\begin{cases} IP_R = 0; \\ \eta_{\max} = \eta_{act} . \end{cases} \quad (2.42)$$

Esant šioms sąlygoms, sistema funkcionuoja didžiausiu galimu termodinaminiu efektyvumu, kuris gali būti pasiektas su konkrečia konfigūracija ir pagamintos entropijos arba sunaikintos eksergijos kiekis gali būti sumažintas tik keičiant sistemos konfigūraciją arba koreguojant kraštines sąlygas, kuriose funkcionuoja sistema.

Neišnaudotas potencialas taikant išplėstinės termodinaminės analizės metodo sąvokas gali būti įvardijamas kaip išvengiamas sunaikintos eksergijos / pagamintos entropijos kiekis. Realaus tobulinimo potencialo dydžiui išreikšti reikalingi dydžiai – faktinis entropijos generavimas ($S_{gen.act}$) ir entropijos generavimo minimumas ($S_{gen.min}$) gali būti apskaičiuojamas tokiu eiliškumu:

1. Apskaičiuoti entropijos generavimo minimumo sąlygas: Entropijos generavimo minimumas pasiekiamas esant pusiausvyrai tarp šilumos mainų ir fluideo tėkmės sukuriamų termodinaminių negrįžtamumų. Ši pusiausvyra išreiškiama Be skaičiumi, kai apskaičiuota vertė pasiekia 0,5 vertę.

2. Išreikšti skirtumą tarp faktinių ir entropijos generavimo minimumo sąlygų:

$$S_{gen.act} = \frac{Ex_{in} - Ex_{out}}{T_a} = \frac{(1 - \eta_{act}) Ex_{in}}{T_a} = \frac{\eta_{act} Ex_{out}}{T_a} . \quad (2.43)$$

Tokiu atveju realus efektyvumo tobulinimo potencialas tarp realaus ir maksimaliai galimo efektyvumo išreiškiamas tokia forma, kuri yra tapati realiam tobulinimo potencialui:

$$IP_R = \eta_{\max} - \eta_{act} = \left(1 - \frac{T_a S_{gen.min}}{Ex_{in}}\right) - \left(1 - \frac{T_a S_{gen.act}}{Ex_{in}}\right) = \frac{T_a (S_{gen.act} - S_{gen.min})}{Ex_{in}} = \frac{T_a (S_{gen.act} - S_{gen.min})}{Ex_{out} + T_a S_{gen.act}}. \quad (2.44)$$

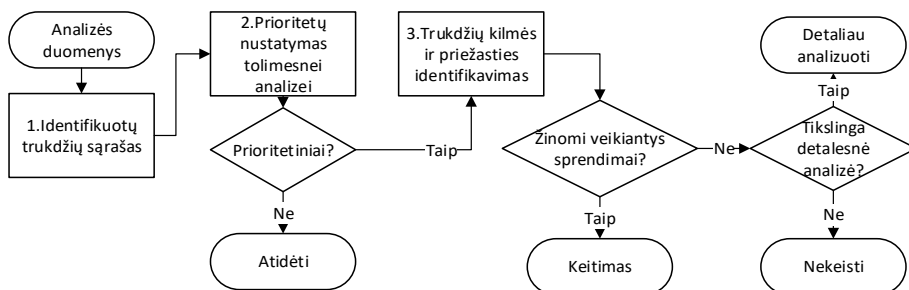
Pasinaudojant šia išraiška, sudaroma aproksimacija, leidžianti išreikšti maksimalų komponento termodinaminį efektyvumą.

2.5. Analizės metodais gaunamos informacijos agregavimas

Taikant sistemų teorijos principus, sistema gali būti suskaidoma į atskiras dedamąsias arba kaip nedalomas junginys prijungta į didesnę sistemą kaip posistemis. Toks sistemų skaidymas ir jungimas suteikia galimybę matyti skirtingus dekompozicijos lygius tarp makro ir mikro sistemų ir jų dedamųjų (elementų ir komponentų). Detalumo lygio sąvoka leidžia apibrėžti ir klasifikuoti sistemoje vykstančių procesų ir funkcijų kompleksiskumą ir atsižvelgiant į jų kiekį ir sąsają taikyti skirtingus modeliavimo ir analizės principus.

Agreguojant analizės metodais gaunamą informaciją, suformuluojami prioriteto faktoriai, leidžiantys pasinaudoti skirtingų metodų ir analizės procedūrų gaunama informacija tikslingiems sprendimams priimti.

Atlikus sistemos analizės etapą pagal siūlomą metodą, galimi tolesni veiksmai turi būti pagrįsti turima informacija ir primami sprendimai turi vesti tiesioginio tikslo – sistemos sezoninio ekserginio efektyvumo padidinimo link. Tam, kad sprendimai būtų laikomi bent iš dalies racionaliais, atliekama gautų rezultatų analizė pagal eigą pateikiamą 2.11 paveiksle.



2.11 pav. Sprendimo priėmimo eiga
Fig. 2.11. Decision making workflow

Pirmojo integruotos analizės etapo generuojama informacija leidžia analizuoti duomenis ir agreguoti į informaciją sudarant prioriteto faktorius priimti sprendimą. Generuoti duomenys (apie sistemos ir jos viduje funkcionuojančių komponentų kontrolinius tūrius, kertančius srautus ir bendruosius rodiklius) leidžia identifikuoti esminius trukdžius, neleidžiančius sistemai funkcionuoti aukštesniu efektyvumu – atskiru laiko žingsniu arba visą nagrinėjamą periodą.

Visi šie trukdžiai turi savo poveikį galutiniam rezultatui, todėl turi būti užfiksuoti. Trukdžiai tarpusavyje skiriasi savo intensyvumu, periodiškumu ir apibendrintu poveikiu sistemos efektyvumui. Tolesniuose sprendimo priėmimo etapuose ši duomenų rinkmena yra analizuojama ir iš jos atrenkami taškai, kuriuos tikslinga koreguoti arba detaliau analizuoti.

Koreguojantys veiksniai yra suprantami kaip nereikalingų, žalingų aspektų, atsirandančių procesuose, elementuose arba valdymo strategijose sumažinimas arba eliminavimas. Galimos sprendimų alternatyvos kiekvieno individualaus elemento lygmenyje gali būti klasifikuotos ir struktūruotai pateiktos tvarka 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Prioritetų pagrindimo matrica

Table 2.3. Priority setting matrix

Sezoninio efektyvumo svorio faktorius	Didelis	Keisti – sprendimų keitimo inicijavimas, esant gerinančioms priemonėms,	Nagrinėti detaliau – trūkstant informacijos korektiškam sprendimui priimti, atliekama detalesnė analizė.
	Mažas	Atidėti – mažą poveikį turinčių problemų fiksavimas, atidedant vėlesniems etapams.	Nekeisti – korektiškai funkcionuojančių elementų užfiksavimas.
		Aiškūs	Nežinomi ir nesuprantami
Trukdžių ir jų priežasties supratimas			

Toks sprendimo priėmimo kontekstas užtikrina racionalų sprendimą atsižvelgiant į galimas alternatyvas ir pagal turimą informacijos kiekį priimant argumentuotą sprendimą.

Dėl skirtingo resursų kiekio, reikalingo termodinaminės analizės metodams panaudoti, būtina sąmoningai (argumentuotai, pagrįstai) rinktis taikytiną metodą. Tam, kad būtų pasirenkamas racionalus analizės proceso kelias, būtina įvertinti žinomus apribojimus ir įvertinti, kokia informacija turi būti gaunama, siekiant objektyvaus sprendimo priėmimo. Projektavimo proceso metu tam, kad būtų

pasiektas numatytas tikslas arba pagerintas esamas sistemos efektyvumas, reikalinga išspręsti surastas problemas – randant galimus sprendimus. Šis procesas gali būti matomas kaip atsakymų į kylančius klausimus radimas. Šio proceso eigoje užduodami klausimai gali būti apibendrinti 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. Projektavimo procese nagrinėjami klausimai

Table 2.4. Design questions examined during design process

Procesinis klausimas	Funkcija / Paskirtis
Iš ko susideda sistemos atliekama funkcija?	Nustatyti, kokios pirminės funkcijos sudaro energinės paslaugos funkciją.
Koks yra funkcijos išpildymo efektyvumas?	Įvertinti, kaip efektyviai išnaudojami resursai funkcijai sukurti.
Kokias alternatyvas pasirinkti?	Kokiomis alternatyviomis priemonėmis ir būdais gali būti atliekama ta pati funkcija.
Kada yra kritiniai laiko periodai ?	Kuriais laiko periodais reikalinga gerinti sistemos efektyvumą.
Kokie elementai riboja sistemos efektyvumą?	Kuriuos elementus koreguoti, tobulinti ar keisti, kad sistemos efektyvumas būtų didesnis.
Kiek galima patobulinti?	Įvertinti sistemos tobulinimo ribą keičiant vieną konkretų elementą.
Kaip turi būti pakeistas komponentas, kad sumažėtų jo neigiamas poveikis?	Kokius pakeitimus galima atlikti mažinant komponento kokybės nuostolius.
Kuriose komponento vietose susidaro didžiausi termodinaminiai nuostoliai?	Identifikuoti kritinius komponentus.
Kokie reiškiniai sukuriant termodinامينius negrįžtamumus dominuoja komponente?	Identifikuoti didžiausią poveikį turinčius reiškinius.
Kokie reiškiniai sukuriant termodinامينius negrįžtamumus dominuoja konkrečioje komponento lokacijoje?	Kurioje komponento geometrijos vietoje yra didžiausi termodinaminiai negrįžtamumai.

Siekiant atsakyti į šiuos klausimus, pasirenkamas analizės metodas, kuriam reikalingas konkretus modelio detalumas ir geometrinio dekomponavimo lygmuo. Analizės procedūros generuoja didelį kiekį informacijos, kurios supratimas

analitikui arba sprendimo priėmimą realizuojančiam metodui gali būti kompliktuotas dėl apimčių, palyginamumo stokos ir prioritetų išdėstymo neapibrėžties. Galima konstatuoti, kad informacijos, kuri yra generuojama analizės metodų, paskirtis yra padėti priimti sprendimus, leidžiančius pagerinti sistemos funkcionalumą ir padidinti momentinį arba sezoninį termodinaminį efektyvumą. Siekiant rezultatyvaus šios funkcijos išpildymo, gauta sudėtinė informacija yra agreguojama iki tarpusavyje palygintinų dydžių (termodinaminiai efektyvumo rodikliai, svorio faktoriai ir kita). Šiame poskyryje aptariamų prioriteto faktorių santrauka pateikiama 2.5 lentelėje.

2.5 lentelė. Prioriteto faktoriai sprendimų priėmimui

Table 2.5. Priority factors for decision making

Rodiklis	Paskirtis
P0	Prioriteto nustatymas svarstomoms alternatyvoms pagal nustatytą TSE rodiklį.
P1	Kritinių periodų identifikavimas pagal sezoninio efektyvumo svorinį koeficientą ir momentinį efektyvumą.
P2	Posistemių (arba komponentų) daromo poveikio sistemos efektyvumui identifikavimas.
P3	Komponentų, sudarančių sistemą, neigiamą tarpusavio sąveikos stiprumą iliustruojantis faktoriai.
P4	Komponentų, turinčių didžiausią tobulinimo potencialą ir svarbą sistemos efektyvumo atžvilgiu, indikavimas.

Normalizavus rodiklius, įvardijami prioritetą išreiškiantys faktoriai, leidžiantys rikiuoti (angl. *sort*) svarstomus pasirinkimus. Pasinaudojant šiais prioriteto faktoriais, gali būti formuojami sprendimai atskiruose sistemos nagrinėjimo lygmenyse, kai reikalinga objektyviai apibrėžti sprendimą lemiančius veiksnus skaitinėmis išraiškomis.

2.5.1. P0 Efektyviausios alternatyvos faktorius

Renkantis tarp galimų alternatyvų, prioritetą turėtų būti teikiamas didžiausią sezoninį termodinaminį efektyvumą turinčiai alternatyvai. Todėl pasirinkimo faktorius P_0 išreiškiamas kaip normalizuotas dydis

$$P_0 = \frac{TSE_{\max} - TSE_i}{TSE_{\max} - TSE_{\min}}. \quad (2.45)$$

Rodiklio taikymas yra korektiškas, kai tarpusavyje lyginamos alternatyvos sukuria tą patį produktą – tos pačios kokybės energetinę paslaugą arba jų rinkinį.

2.5.2. P1 kritinių periodų, turinčių neigiamą poveikį sezoniniam efektyvumui identifikavimas

Siekiant nustatyti, kuriais periodais komponentų efektyvumas turi būti nagrinėjamas detaliau, naudojamas P2 prioriteto faktorius. Šis prioriteto faktorius gali būti išreikštas kiekvienam elementui, kiekvienu laiko žingsniu. Skaičiavimo procedūros atliekamos pasinaudojant momentiniais termodinaminiais efektyvumais ir svoriniais koeficientais C_i .

Pagal šiuos rodiklius dalis gautų duomenų taškų yra atmetami kaip mažą poveikį turintys arba didelio efektyvumo rodikliai, turintys teigiamą poveikį TSE rodikliui.

Siekiant koncentruotis į didžiausią poveikį sistemos sezoniniam efektyvumui turinčius trukdžius, kurių eliminavimas atneštų didžiausią naudą sistemos efektyvumui, atliekama prioritetų nustatymo procedūra. Šis metodas pagrįstas funkcionavimo taškų grupavimu pagal momentinį efektyvumą ir svorio koeficientą išreišskiantį indėlį į sezoninį efektyvumą.

Atmetimas ir filtravimas gali būti pateikiamas grafiniu būdu pagal matricą, pateikiamą 2.6 lentelėje.

2.6 lentelė. Prioritetų pasirinkimo matrica pagal momentinį ir sezoninį svorio koeficientą

Table 2.6. Priority setting matrix according to thermodynamic efficiency and weight factor C_i

Sistemos (komponento) momentinis efektyvumas	Didelis	A – aukštas efektyvumas, mažas sezoninis efektyvumo svoris.	B – aukštas efektyvumas, ilga trukmė
	Mažas	C – mažas efektyvumas, trumpa trukmė.	D – mažas efektyvumas, ilga trukmė
		Mažas	Didelis
Sezoninio efektyvumo svorio koeficientas			

Riba, atskirianti efektyvumo rodiklį ir svorio koeficientą C_i , pasirenkama atsižvelgiant į galimas analizės apimtis. Riba gali reprezentuoti duomenų masyvo vidurkį, kvartilių reikšmes arba kumuliacinį taškų kiekį. Pasirinktas dydis lemia atrenkamų taškų kiekį tolesniam nagrinėjimui.

Prioriteto faktorius, išreiškiamas kaip normalizuotų verčių suma iš atrinkto parametrų intervalo:

$$WC_i = \frac{C_i - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}; \quad W\eta_i = \frac{\eta_{\max} - \eta_i}{\eta_{\max} - \eta_{\min}}; \quad (2.46-47)$$

$$a_i = \sqrt{WC_i^2 + W\eta_i^2}; \quad P_i = \frac{a_i - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}}, \quad (2.48-49)$$

čia WC_i – svorio faktorius, išskiriantis C_i , svorio faktorius; $W\eta_i$ – svorio faktorius, išskiriantis termodinaminis efektyvumus a_i – atstojamasis faktorius, apibendrinantis padėtį pagal WC_i ir $W\eta_i$ svorio faktorius.

Didžiausią vertę turintis prioriteto faktorius nurodo laiko žingsnius, kuriuose atlikus tobulinimo veiksmus, pasiekiamas didžiausias poveikis sistemos arba elemento termodinaminiam sezoniniam efektyvumui iš pasirinktos rodiklių erdvės.

Skiriamoji riba tarp mažo ir didelio efektyvumo ir svorio koeficientų gali būti nustatyta atsižvelgiant į vykdymo sąnaudas, reikalingas efektyvumo didinimo analizei atlikti. Galimas skiriamųjų ribų nustatymas pagal taškų išsidėstymo tankį kiekvienoje iš dimensijų.

Tokiu atveju skiriamosios ribos nustatomos pagal norimas analizės apimtis:

- nuo atvejo, kai skiriamoji riba numatoma siekiant didžiausių apimčių (I);
- iki atvejo, kai skiriamoji riba numatoma siekiant mažiausių apimčių (II).

Funkcionavimo taškams, patenkantiems į didelio svorio ir mažo efektyvumo zoną (D), turi būti skiriamas prioritetas ir jų keitimas arba detalesnis nagrinėjimas yra prasmingas, nes šių elementų sukuriamų trikdžių eliminavimas lems didžiausią sezoninio efektyvumo prieaugį.

2.5.3. P2 kritinių sistemos elementų identifikavimas

Siekiant nustatyti prioritetus komponentams, turintiems didžiausią neigiamą poveikį aukštesnio lygio sistemai, atsižvelgiama į sudėtinės sistemos momentinio termodinaminio efektyvumo išraišką, apibrėžiančią kiekvieno sistemą sudarančio elemento įtaką efektyvumui per sunaikintos eksergijos kiekį. Atskirų posistemų poveikis bendram sistemos sezoniniam efektyvumui yra nevienodas dėl skirtingų posistemio ribas kertančių eksergijos srautų dydžių ir sukuriamo termodinaminio negrįžtamumo.

$$\eta_{sis} = 1 - \frac{\sum L}{\sum Ex_{in}} = 1 - \frac{L_1}{\sum Ex_{in}} + \dots + \frac{L_n}{\sum Ex_{in}}. \quad (2.50)$$

Atskiuro komponento poveikį išreiškianti dedamoji įvardijama kaip dedamoji D, kuri i-tajam sistemos komponentui gali būti išreiškiama kaip:

$$D_i = \frac{L_i}{\sum Ex_{in}}. \quad (2.51)$$

Pasinaudojant apskaičiuotais dydžiais D, gali būti nustatomas prioriteto faktorius kiekvienai sub-sistemai, išreiškiamas prioriteto faktorius

$$P_2 = \frac{D_i - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}}. \quad (2.52)$$

Pasitelkiant šį faktorių, nustatomi prioritetai žemesnio sistemos dekompozicijos lygio dėmenims. Pagal sudarytą prioritetų eilę pasirenkamos žemesnio lygmens dedamosios tolesnei analizei arba keitimui.

2.5.4. P3. Elementų, darančių didžiausią neigiamą poveikį kitiems sistemos komponentams nustatymas

Suskaidžius sunaikintos eksergijos kiekį komponente į Endogeninę ir Eksogeninę dedamąsias, kurios reprezentuoja termodinaminių negrįžtamumų atsiradimą dėl vidinių ir išorinių reiškinių, išreiškiamas jų santykis γ (pagal 2.61 formulę). Atsižvelgiant į komponentų tarpusavio susietumą, galima teigti, kad komponentai, kuriuose dominuoja vidiniai veiksniai, turi neigiamą poveikį kitiems sistemos elementams. Siekiant identifikuoti šiuos komponentus, suformuojamas prioriteto faktorius:

$$a_{P3} = \frac{\gamma_i - 0,5}{\gamma_{\max} - 0,5}. \quad (2.53)$$

Pasitelkiant kritinių sistemos elementų prioriteto faktorių, apskaičiuotą tam pačiam kontroliniam tūriui, gaunamas išvestinis dydis

$$b_{P3} = \sqrt{a_{P3}^2 + P_2^2}; \quad (2.54)$$

$$P_3 = \frac{b_{P3,i} - b_{P3,\min}}{b_{P3,\max} - b_{P3,\min}}, \quad (2.55)$$

čia $a_{p3,i}$ – svorio faktorius, nurodantis padėtį pagal endogeninę ir eksogenines termodinaminio nuostolių dedamąsias; $b_{p3,i}$ – atstojamasis svorio faktorius, apibendrinantis padėtį pagal svorio faktorių $a_{p3,i}$ ir prioriteto faktorių P_2 .

Pasinaudojant b koeficiento ir masyve esančiomis minimumo ir maksimumo vertėmis, išreiškiamas prioriteto faktorius, apibrėžiantis komponentų nagrinėjimo eiliškumą atsižvelgiant į poveikį aukštesnio lygio sistemos efektyvumui ir neigiamam poveikiui kitų komponentų atžvilgiu.

2.5.5. P4. Didžiausią tobulinimo potencialą turinčių komponentų, kuriems yra tikslingas tobulinimas, identifikavimas

Siekiant kryptingai nukreipti pastangas į komponentų, kurie turi didžiausią realų tobulinimo potencialą (pagal 2.44 formulę), apskaičiuojamas realaus tobulinimo faktoriaus svorio faktorius $WIP_{P,k}$ kiekvienam elementui k_i

$$WIP_{R,k} = \frac{IP_{R,k} - IP_{R,\min}}{IP_{R,\max} - IP_{R,\min}}. \quad (2.56)$$

čia IP_R – realus tobulinimo potencialas, apskaičiuojamas pagal 2.44 formulę.

Siekiant nustatyti prioritetą komponentui, kuris turi didžiausią neigiamą poveikį aukštesnio lygio sistemai ar posistemii, atsižvelgiama į sudėtinės sistemos momentinio termodinaminio efektyvumo išraišką, apibrėžiančią kiekvieno sistemą sudarančio elemento įtaką efektyvumui per sunaikintos eksergijos kiekį pagal faktorių D (apskaičiuojamą pagal 2.51 formulę). Rodiklis normalizuojamas pasitelkiant svorio faktorių WD_i

$$WD_k = \frac{D_k - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}}. \quad (2.57)$$

Svorio faktorius, išreiškiančius prioritetą pagal tobulinimo potencialą ir poveikį sistemos efektyvumui apibendrinantis rodiklis $b_{p4,i}$, išreiškiamas:

$$b_{p4,i} = \sqrt{WIP_{R,k}^2 + WD_{i,k}^2}. \quad (2.58)$$

Prioriteto faktorius konkrečiam komponentui atsižvelgiant į anksčiau aptartus veiksnus, išreiškiamas normalizuojant sudėtinį svorio faktorių P_4 :

$$P_4 = \frac{b_{p4,i} - b_{p4,\min}}{b_{p4,\max} - b_{p4,\min}}. \quad (2.59)$$

Pasinaudojant šiuo prioriteto faktoriumi, komponentai gali būti išrikiuoti pagal poveikį sistemos efektyvumui ir realų tobulinimo potencialą, kuris atspindi galimybę padidinti komponento našumą.

2.6. Termodinaminės analizės metodų adaptacija ir modifikacijos termohidrodinaminių kontūrų sistemos analizei

Rezultatyviam termodinaminės analizės taikymui reikalinga detali informacija apie sistemos funkcionavimo rodiklius, jų kitimą, komponentų sukuriamą neigiamą poveikį sistemos efektyvumui ir tarpusavio sąveikos indikacijas. Tam, kad ši informacija būtų generuota, yra atliekamos analizės procedūros, pagrįstos metodais, išplečiančiais tradicinės termodinaminės analizės galimybes. Šiame poskyryje aprašomi metodai, suteikiantys papildomą informaciją, reikalingą kryptingai vykdyti analizę. Pristatomas *realaus tobulinimo potencialo* (IP_r) dydis, identifikuojantis termodinaminius proceso apribojimus. Aprašomos komponentų tarpusavio sąveiką indikuojančių dydžių išraiškos (išplėstinė termodinaminė analizė) ir termodinaminių negrįžtamumų lokaciją komponento geometrijoje identifikuojantis metodas (lokalaus entropijos generavimo analizė). Pasitelkiant šių metodų sukuriamą informaciją, atliekami sistemos termodinaminio efektyvumo didinimo veiksmai.

Išplėstinės termodinaminės analizės tikslas – suskaidyti identifikuotus termodinaminius negrįžtamumus pagal jų kilmę ir neišvengiamumą (Tsatsaronis, Morosuk 2001). Negrįžtamumų kilmės supratimas sudaro galimybę identifikuoti komponentus, kuriuose dominuoja sunaikintos eksergijos kiekis dėl išorinių veiksnių. Todėl šių komponentų tobulinimas nėra prasmingas, nes atliekami keitimai nešalina priežasties. Identifikavus komponentus, turinčius dominuojančius vidinius veiksnius ir juos eliminavus, sumažinamas neigiamas poveikis ir kitiems sistemos komponentams, su kuriais susijęs koreguojamas dėmuo.

Sunaikintos eksergijos kiekis pagal išplėstinės termodinaminės analizės teoriją (Tsatsaronis et al. 1999) gali būti suskaidytas į dėl vidinių (endogenous) ir išorinių (exogenous) veiksnių atsirandančių termodinaminių negrįžtamumų. Kiekvieno elemento patiriami nuostoliai dėl vidinių veiksnių gali būti išreiškiami kaip tapatus komponento sunaikintam eksergijos kiekiui, kai visi kiti elementai funkcionuoja nesukurdami termodinaminių negrįžtamumų, t. y. entropijos gamyba lygi 0. Vidinių ir išorinių komponentų negrįžtamumų suskaidymas yra pagrįstas formuluote:

$$Ex_{dest} = Ex_{dest}^{EN} + Ex_{dest}^{EX}. \quad (2.60)$$

Dėl komponentų tarpusavio sąveikos sistemoje komponentai, kuriuose dominuoja išoriniai veiksniai, patiria termodinaminius negrįžtamumus dėl kitų komponentų poveikio. Identifikavus komponentus, kuriuose dominuoja vidinė negrįžtamumų kilmė dėl komponentų tarpusavio sąsajos, galima teigti, kad dėl tokio jo funkcionavimo atsiranda nuostolių prieaugis kituose komponentuose.

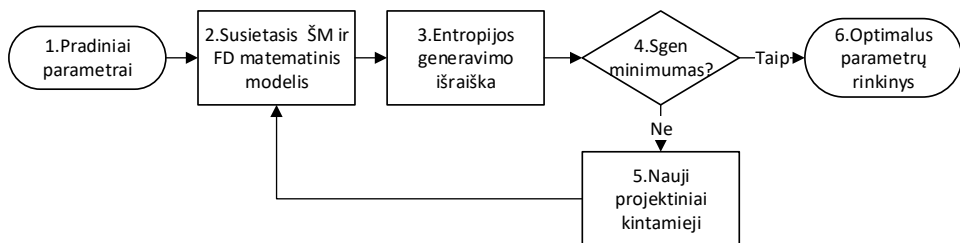
Siekiant įvardyti dominuojančius veiksnius išreiškiant komponento efektyvumą, nustatomas svertinis rodiklis

$$\gamma = \frac{L^{EN}}{L^{EN} + L^{EX}}. \quad (2.61)$$

Šis santykis įgauna vertes, mažesnes nei 0,5, jei dominuoja išoriniai reiškiniai, ir didesnė nei 0,5 – jei dominuoja vidiniai veiksniai. Dėl tarp sistemos komponentų esančios sąsajos ir tarpusavio sąveikos dominuojantys išoriniai veiksniai reiškia, kad komponento efektyvumas yra veikiamas kitų sistemos komponentų. Jei dominuoja vidiniai reiškiniai – kontroliniame tūryje apribotų elementų efektyvumas priklauso nuo jų funkcionavimo.

Pasinaudojant svertinio rodiklio vertėmis, komponentų grupės gali būti išrikiuojamos pagal dominuojančius vidinius arba išorinius veiksnius.

Entropijos generavimo minimizavimas (EGM) yra deterministinį požiūrį propaguojantis metodas, kurio uždavinys gali būti apibrėžiamas entropijos generavimo kaip tikslo funkcijos minimizavimas, kai kritiniai parametrai, tokie kaip funkcionavimo sąlygos, yra matomi kaip projektiniai kintamieji. Tokių būdų EGM analizė susideda iš optimalių parametų paieškos ir termodinaminės analizės metodų. Literatūroje nėra gausu šio metodo taikymo schematinių algoritmų, kurie būtų tinkami tiesioginiam adaptavimui, todėl šio darbo kontekste, 2.12 paveikle remiantis Bejan 1996, Sciacovelli et al. 2015 darbais, pateikiama adaptuota EGM algoritmo versija.



2.12 pav. Entropijos generavimo minimalizavimo procesas

Fig. 2.12. The process of entropy generation minimization

Taikant šią sprendimo eigą, randamos sąlygos, kurioms esant komponentas funkcionuoja sukurdamas mažiausią kiekį termodinaminių nuostolių esant nustatytiems apribojimams. Pasitelkus daugiakriterijinius optimizavimo metodus, gali būti randamas parametų rinkinys, užtikrinantis absoliučiai mažiausią generuojamos entropijos kiekį. Šis dydis žymi faktiškai pasiekiamą termodinaminio efektyvumo ribą. Detalesnis proceso aprašymas ir teorinis pagrindimas pateikiamas disertacijos *E priede*.

Diferencialiniame lygmenyje atsirandantis entropijos generavimas gali būti vertinamas kaip pirminis arba priežastinis veiksnys, sukuriantis sistemos lygmenyje matomus termodinaminius negrįžtamumus. Pateikiama entropijos

generavimo dekompozicija baigtiniame tūryje / elemente gali būti klasifikuojama į kietuose kūnuose ir fluiduose vykstančius reiškinius. Priklausomai nuo tėkmės pobūdžio, entropijos gamyba fluide tėkmėje gali būti dekomponuoti trinties jėgų (*genD*) ir laidumo reiškinių (*genC*) veikiamas dedamąsias:

$$S_{gen} = S_{genD} + S_{genC} . \quad (2.62)$$

Turbulentinės tėkmės atveju atsiranda papildomos dedamosios dėl fluktuacijų tėkmėje ir entropijos generavimo išraiška gali būti dekomponuota į dėmenis, reprezentuojančius vidutines ir pulsacines reikšmes:

$$S_{gen} = S_{gen \bar{D}} + S_{gen D'} + S_{gen \bar{C}} + S_{gen C'} . \quad (2.63)$$

Tokiu būdu generuojama entropija yra suskaidoma į komponentes, reprezentuojančias vidutinius tėkmėje susidarančius reiškinius ($S_{gen \bar{D}}$ ir $S_{gen \bar{C}}$) ir dėl fluktuacijų ir pulsacijų atsirandančius reiškinius, būdingus turbulentinei tekmei ($S_{gen D'}$ ir $S_{gen C'}$).

Šios sumos dedamosios gali būti išreikštos kaip entropiją generuojančios komponentės turbulentinei tekmei (Herwig, Kock 2005):

1. Tiesioginės disipacijos į kanalo sienelės sukurtas entropijos generavimas, išreiškiamas pirminiais srauto kintamaisiais:

$$S_{PRO, \bar{D}} = \frac{\mu}{\bar{T}} \cdot \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right)^2 \right\} ; \quad (2.64)$$

2. Tiesioginė entropijos produkcija dėl šilumos perdavimo vidutinio temperatūros gradiento atžvilgiu. Pagal pirminius kintamuosius SFD modeliavimo paketuose išreiškiamas vidutinės entropijos generavimo kiekis:

$$S_{PRO, \bar{C}} = \frac{\lambda}{\bar{T}^2} \left[\left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right)^2 \right] . \quad (2.65)$$

Pusiausvyra tarp termodinaminių negrįžtamumų gali būti išreiškiama Bejan skaičiumi.

$$Be = \frac{S_{gen.C}}{S_{gen.C} + S_{gen.D}} . \quad (2.66)$$

Dominuojantis veiksnys leidžia nustatyti prioritetus taikyti sprendimus atsižvelgiant į geometriją ar kitas tėkmės kanalo charakteristikas.

Informacija apie entropijos generavimą, gaunama iš modeliavimo rezultatų, gali rodyti, kad:

1. Entropijos kiekis auga pastoviai per visą elemento geometriją;
2. Entropijos generavimas intensyvėja dėl lokalių reiškinių, kurie gali būti charakterizuojami vietinių kliūčių koeficientais;
3. Kompleksiškas entropijos generavimas sunkiai arba necharakterizuojamų veiksmų.

Priklausomai nuo modeliujamo elemento, sistemos kompleksiskumo tokio pobūdžio informacija apie entropijos generavimo intensyvumo kitimą gali būti iš anksto žinoma.

2.7. Efektyvumo įvertinimo apibrėžimas

Taikant skaičiavimų kompleksiskumo (angl *computational complexity*) nustatymo (Sipser 2006; Du, Ko 2014), metodą, gali būti įvertinamas sąlyginis skaičiuojamųjų resursų poreikis. Pasinaudojant šia metodika išreiškiančia skaičiuojamųjų resursų kiekį kaip priklausomą nuo operacijų skaičiaus, gali būti išreikšiamos resursų sąnaudos skaičiuojamųjų procesų atlikimui. Tam, kad būtų preliminarai įvertinamos sąnaudos, reikalingos skirtingo detalumo modeliams generuoti, simuliuoti ir rezultatams apdoroti, naudojama santykinė išraiška, susidedanti iš esminių dėmenų:

$$N_{tot} = N_{create} + N_{sim} + N_{int\,erp} . \quad (2.67)$$

čia N_{create} – imitacinio modelio sudarymui reikalingi resursai; N_{sim} – imitacinio modeliavimo atlikimui reikalingi resursai; $N_{int\,erp}$ – rezultatų apdorojimui ir interpretavimui reikalingi resursai; N_{tot} – dėmenų suma.

Kiekvienas iš šių dėmenų gali būti interpretuojamas kaip bedimensinė funkcija, priklausanti nuo modelio kompleksiskumo ir sudėtingumo. Nesant galimybės išreikšti sąnaudų absoliutiniais dydžiais, naudojamas indeksas, apibūdinantis faktinio ir didžiausio palyginime esančio rodiklio vertę. Siekiant įvertinti šio indekso netiesinį kitimą, santykis gali būti pakeliamas laipsnių k , kuris gali indekso kitimui eksponentinio augimo arba stabilizuojančio kitimo pobūdį. Tai išreiškiama formule:

$$R_n = \left(\frac{n}{n_{\max}} \right)^k , \quad (2.68)$$

čia n – rodiklio vertė konkrečiame taške; n_{max} – maksimali vertė visame vertinamų reikšmių intervale; k – laipsnio rodiklis, įvertinantis kitimo tendencijos priklausomybę.

Skirtingi faktoriai, lemiantys sąnaudų poreikį modeliavimo procedūroms atlikti, turi skirtingą poveikį ir įtaką galutinėms modeliavimo proceso sąnaudoms. Todėl normalizuotiems rodikliams (R) bendroje išraiškoje reikalingas svertinis rodiklis, apibūdinantis rodiklių tarpusavio prioritetus ir poveikį. Šie svoriniai rodikliai gali būti nustatomi pasitelkiant Analitinės hierarchijos proceso (angl. *Analytical Hierarchy Process*, toliau AHP) metodą (Saaty 1980).

Santykinės sąnaudos modeliui sukurti išreiškiamos kaip polinominiu paviršiumi aprašoma priklausomybė nuo komponentų skaičiaus (x) ir jų detalumo laipsnio (y).

$$N_{create} = a \cdot \frac{1}{2} \left(\left(\frac{x}{x_{max}} \right)^{k_1} \cdot \left(\frac{y}{y_{max}} \right)^{k_2} \right), \quad (2.69)$$

čia a – modelio sukūrimui poveikį įvertinantis svorio faktorius ($a = 0,503$); k_1 – laipsnio rodiklis, apibūdinantis kitimo tendenciją dėl komponentų skaičiaus ($k_1 = 0,2 \div 1$); k_2 – laipsnio rodiklis, apibūdinantis kitimo tendenciją dėl komponentų detalumo laipsnio ($k_2 = 0,2 \div 1$).

Santykinės sąnaudos sprendimams gauti aprašomos kaip polinominiu paviršiumi išreikšta priklausomybė nuo skaičiuojamųjų taškų (laisvės laipsnių z) ir laiko žingsnių skaičiaus (v):

$$N_{sim} = b \cdot \frac{1}{2} \left(\left(\frac{z}{z_{max}} \right)^{k_3} \cdot \left(\frac{v}{v_{max}} \right)^{k_4} \right), \quad (2.70)$$

čia b – svorio faktorius, įvertinantis simuliacijos procedūrų įtaką sąnaudoms ($b = 0,371$); k_4 – laipsnio rodiklis, apibūdinantis kitimo tendenciją dėl laiko žingsnių skaičiaus ($k_4 = 0,2 \div 1$); k_3 – laipsnio rodiklis, įvertinantis laisvės laipsnių poveikį rezultatui ($k_3 = 0,2 \div 1$).

Santykinės sąnaudos modeliavimo rezultatams apdoroti ir interpretuoti priklauso nuo gautų rezultatų skaičiaus, kuris turi tiesioginę priklausomybę nuo laiko žingsnių (v) ir gaunamų sprendinių skaičiaus viename skaičiuojamajame taške (w).

$$N_{interp} = c \cdot \frac{1}{2} \left(\left(\frac{w}{w_{max}} \right)^{k_5} \cdot \left(\frac{v}{v_{max}} \right)^{k_6} \right), \quad (2.71)$$

čia c – svorio faktorius, įvertinantis interpretavimo procedūrų įtaką sąnaudoms ($c = 0,124$); k_5 – laipsnio rodiklis, įvertinantis kitimo tendenciją dėl gaunamų rezultatų kiekio viename komponente ($k_5 = 0,2 \div 1$); k_6 – laipsnio rodiklis, apibūdinantis kitimo tendenciją dėl laiko žingsnių kiekio ($k_6 = 0,2 \div 1$).

Pasinaudojant šiomis išraiškomis, gali būti preliminariai įvertintos bendrosios sąnaudos analizei skirtingais detalumo lygiais, atlikti. Šios priklausomybės yra santykinės kompleksiško išraiškos ir gali būti koreguojamos taip, kad atitiktų pasirinktą metodą ir programinės įrangos naudojamo sprendimo gavimo procedūros našumą. Šio darbo apimtyse šios sąnaudų funkcijos naudojamos palyginamuoju principu.

2.8. Antrojo skyriaus išvados

1. Suformuotas termodinaminio sezoninio efektyvumo skaičiavimo metodas leidžia įvertinti ir analizuoti TSE rodiklį kintančiomis apsupties sąlygomis. Metodus užtikrina rodiklio validumą PTD ir ATD atžvilgiu ir įgalina išreikšti atskirų elementų efektyvumą poveikį visos grandinės efektyvumo rodikliui.

2. Sistemos komponentams apibrėžtas realus tobulinimo potencialas, kuris išreiškia fiziškai įmanomą komponento tobulinimo ribą. Realus tobulinimo potencialas leidžia tikslingai pasirinkti sistemos komponentus detalesnei analizei siekiant padidinti sistemos termodinaminį sezoninį efektyvumą.

3. Suformuota sistemos analizės metodika leidžia pasirinkti adekvačius metodus sistemos analizei pagal dekompozicijos laipsnį ir modelio detalumą. Apibrėžtos identifikavimo ir prioritetizavimo procedūros bei suformuota atskaitos sistema, kurios leidžia nuosekliai didinti sistemos efektyvumą.

Termodinaminio sezoninio efektyvumo nustatymas ir didinimo metodo taikymas

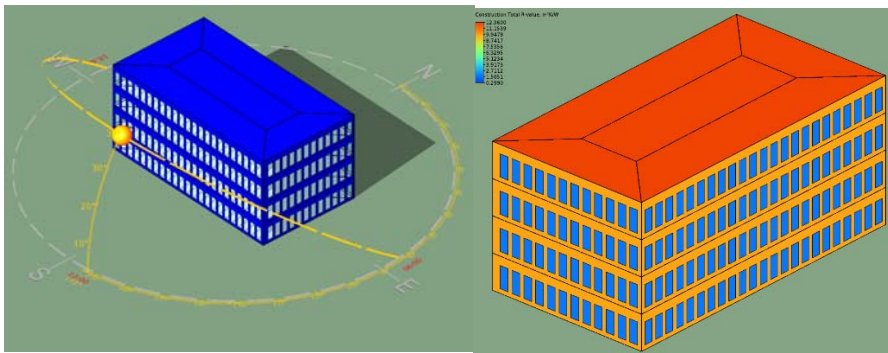
Šiame skyriuje pristatoma atvejo analizė skirta pademonstruoti teorinėje dalyje pristatomo termodinaminio sezoninio efektyvumo (TSE) rodiklio apskaičiavimo metodo galimybes. Analizė atliekama skirtinguose sistemos dekompozicijos lygmenyse naudojant tam lygiui tinkamas modeliavimo ir termodinaminės analizės metodikas.

Skyriuje pateikiama sudėtinės sistemos analizės, teikiančios pastatui energines paslaugas, kurių funkcija – sukurti šiluminį komfortą šiltuoju ir šaltuoju metų periodu, aprūpinti karštu vandeniu, užtikrinanti reikalingus tiekiamo oro parametrus. Atvejo analizė atliekama pasinaudojant programinės įrangos paketais IES VE, TRNSYS, MATLAB ir COMSOL Multiphysics.

Šios atvejo analizės tikslas – pademonstruoti sudaryto TSE metodo ir TSE gerinimo metodikos funkcionalumą analizuojamo objekto kontekste. Skyriaus tematika paskelbti 6 autoriaus publikacijos (Januševičius et al. 2019; Januševičius et al. 2014; Januševičius et al. 2015; Januševičius et al. 2015; Januševičius, Streckienė 2015; Bielskus et al. 2013).

3.1. Pradinės sąlygos ir nagrinėjamas atvejis

Pateikiama sudėtinės sistemos, aptarnaujančios viešosios paskirties pastatą, atvejo analizė. Dinaminis pastato energijos poreikių modelis sudarytas IES VE programa, kurioje modeliuojami pastato energijos srautai per pastato apvalkalo elementus, detalai vertinamas saulės spinduliuotės poveikis pastato energijos balansui. Modeliuojamas pastatas yra 2660 m² kondicionuojamo ploto. Modeliavimas atliekamas laikant, kad pastatas stovi Lietuvoje, Kaune. Pastato atitvarų charakteristikos atitinka šalyje galiojančius reikalavimus A+ energinio naudingumo klasei pasiekti (STR 2.01.02:2016). 3.1 pav. matomas pastato 3D modelis IES VE aplinkoje: kairėje – modelis ir jo orientacija pasaulio šalių atžvilgiu, dešinėje – pastato atitvarų šiluminės varžos spalvine gama atvaizduojanti vizualizacija.

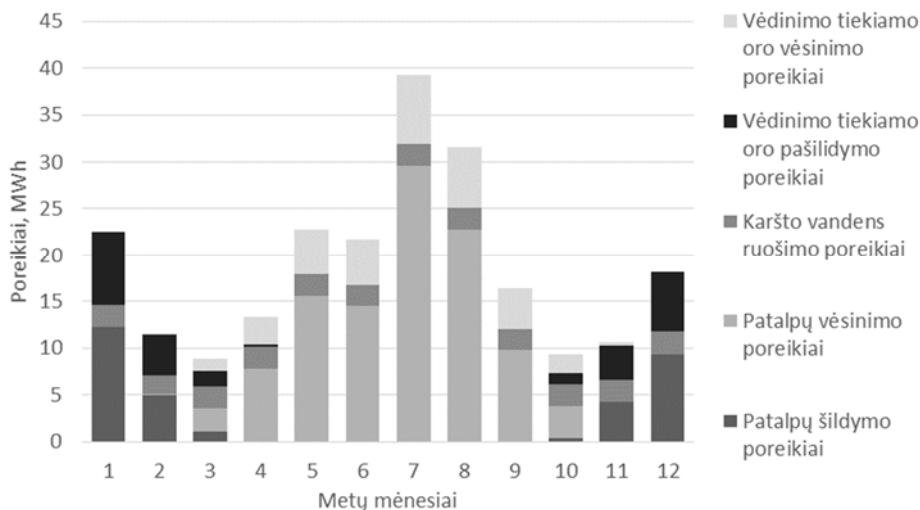


3.1 pav. Analizuojamo pastato geometrija IES VE programoje
Fig. 3.1. Geometry of analysed building in IES VE software tool

Esminės pastato apvalkalo šiluminės charakteristikos gali būti apibendrintos šilumos perdavimo koeficientais: sienos – 0,12 W/m²K; stogas – 0,10 W/m²K; langai – 0,9 W/m²K; perdanga – 0,15 W/m²K. Pastatas yra 4 aukštų, suskaidytas į 5 principines zonas, reprezentuojančias pastato patalpų grupes, išskirtas pagal orientaciją pasaulio šalių atžvilgiu ir centrinę pastato zoną.

Pastato tūris – 9310 m³. Bendras vidutinis įstiklinimo ir vertikalių atitvarų santykis 35 % pasirinktas taip, kad pastatas komforto atžvilgiu racionaliai sunaudotų šiluminę ir vizualinę (natūralus ir dirbtinis apšvietimas) energiją (Motuzienė 2010). Pastato energijos poreikių modeliavimui pasirinkti tipiniai meteorologiniai metai iš *EnergyPlus* regioninės meteorologinių duomenų bazės (EnergyPlus 2016), reprezentuojančios tipines klimatinės sąlygas Lietuvoje pagal 1990–2005 metų periodą (IWEK Kaunas 266290).

Pastatą aptarnaujantys šildymo, vėsinimo ir vėdinimo posistemiai modeliuojami skirtingu detalumu. Pastato energetinės charakteristikos gali būti apibūdinamos rodikliais, pavaizduotais 3.2 paveiksle.



3.2 pav. Mėnesinis energijos poreikių pasiskirstymas pagal paslaugas
Fig. 3.2. Monthly energy consumption distribution by energy services

Lyginamieji dydžiai, apibūdinantys pastato charakteristikas: patalpų šildymo poreikis $12,2 \text{ kWh/m}^2$; vėdinimo sistemos tiekiamo oro pašildymo poreikis $9,5 \text{ kWh/m}^2$; patalpų vėsinimas $39,7 \text{ kWh/m}^2$; vėdinimo sistemos tiekiamo oro vėsinimas $12,9 \text{ kWh/m}^2$; karšto vandens ruošimo poreikis – $10,5 \text{ kWh/m}^2$. Pagrindiniai posistemių, iš kurių sudaryta nagrinėjama sistema, parametrai pateikiami 3.1 lentelėje.

Temperatūriniai režimai šilumos ir vėsos šaltiniuose kinta priklausomai nuo apkrovos, proporcingai faktinės ir maksimalios galios santykiui. Esant maksimaliai galiai, temperatūros yra tapačios projektinėms vertėms, nurodytoms 3.1 lentelėje. Naudojamas šilumnešis šildymo sistemose – vanduo ($C_p = 4,18 \text{ kJ/kgK}$, $\rho = 988 \text{ kg/m}^3$) ir propilen–gliukolio ir vandens mišinys vėsinimo sistemose ($C_p = 4,02 \text{ kWh/kg}$, $\rho = 1023 \text{ kg/m}^3$). Šilumnešių charakteristikos vertinamos kaip kintančios priklausomai nuo terpės temperatūros.

3.1 lentelė. Sistemą sudarančių posistemų charakteristikos**Table 3.1.** The characteristics of subsystems from main system

Eil. Nr.	Posistemis	Posistemio funkcija	Šilumos arba vėsos šaltinis	Maksimali galia, temperatūros
1	Patalpų šildymo	Užtikrinti patalpų komfortinę temperatūrą (21 °C)	Centralizuoti šilumos tinklai $T_i/T_o = 90/60$ °C	175,22kW $T_1/T_2 = 55/40$ °C
2	Vėdinimo, šildymo režimu	Užtikrinti higieninę oro kaitą tiekiant pašildytą orą (20 °C)	Centralizuoti šilumos tinklai $T_i/T_o = 90/60$ °C	135,99 kW $T_1/T_2 = 55/40$ °C
3	Karšto vandens ruošimo	Tiekti karštą vandenį vartotojui (55 °C)	Centralizuoti šilumos tinklai $T_i/T_o = 90/60$ °C	22,05 kW $T_1/T_2 = 60/40$ °C
4	Patalpų vėsinimo	Užtikrinti patalpų komfortinę temperatūrą (24 °C)	Kompresorinė šalčio mašina $T_i/T_o = 7/12$ °C	557,59 kW $T_1/T_2 = 12/15$ °C
5	Vėdinimo, vėsinimo režimu	Užtikrinti higieninę oro kaitą tiekiant atvėsintą orą (20 °C)	Kompresorinė šalčio mašina $T_i/T_o = 7/12$ °C	113,59 kW $T_1/T_2 = 12/15$ °C

Posistemų funkcionavimas valdomas pagal laiko programą, kontrolės elementai koreguoja veikimo parametrus atsižvelgiant į realiems valdymo elementams būdingą tolerancijos (angl. *deadband*) intervalą.

Hidrauliniai kontūrai (modelio schema pateikiama 3.3 pav.) modeliuojami įtraukiant esminius gamybos, perdavimo ir šilumos mainų elementus: vamzdynus, tarpinius ir integruotus šilumokaičius, patalpų vėsinimo ir šildymo terminalus, vėdinimo įrenginių šildymo ir vėsinimo sekcijas ir šilumogrąžos įrenginius.

Hidraulinio tinklo konfigūracija yra atspindima TRNSYS modelio konfigūracija. Smulkūs tinklo elementai (hidraulinės kliūtys, reguliavimo armatūra) nėra atskirai modeliuojami – jų poveikis yra atspindimas tinklo pasipriešinimo charakteristika. Sistemų elementų dydžiai yra pasirenkami pagal inžinerinėje praktikoje taikomus principus, remiantis LST EN standartuose apibrėžta tvarka. Atskirų patalpų charakteristikos modeliavime yra atspindimos atstojamaisiais dydžiais, reprezentuojančiais individualių terminalų grupės elgseną. Šios prielaidos yra priimamos siekiant sumažinti sudaromo modelio kompleksiskumą ir siekiant sumažinti dėl didelio įvesties duomenų kiekio susidarančią neapibrėžtį.

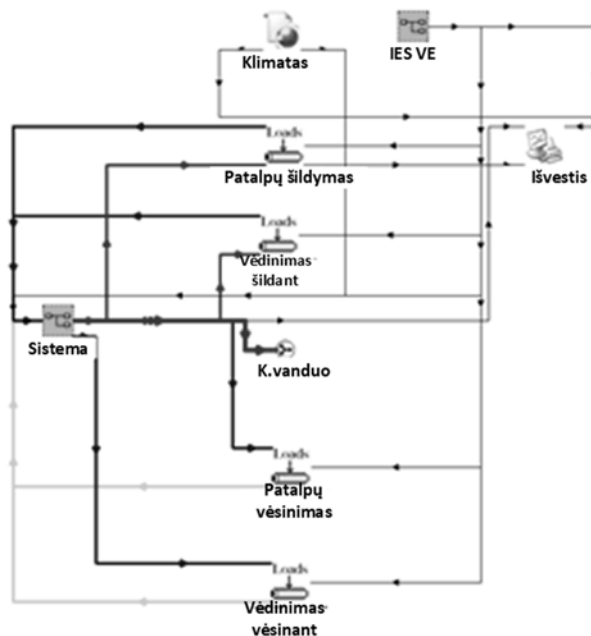
Apskaičiuoti energijos srautai tiesiogiai atspindi hidrodinaminiuose kontūruose cirkuliuojančio šilumnešio parametrų ir energinių paslaugų vartotojų tarpusavio sąveikos rezultatą. Termodinaminių rodiklių analizė atliekama pagal 2.2 poskyryje išdėstytą metodiką.

3.2. Analizuojama sistema

Šiame poskyryje detalizuojami termodinaminio sezoninio efektyvumo (TSE) metodo generuojami rezultatai ir TSE didinimo metodikos žingsniai. Pateikiama analizė skirtinguose detalumo lygmenyse.

3.2.1. Sistemos lygmenyje (L1) atliekama analizė

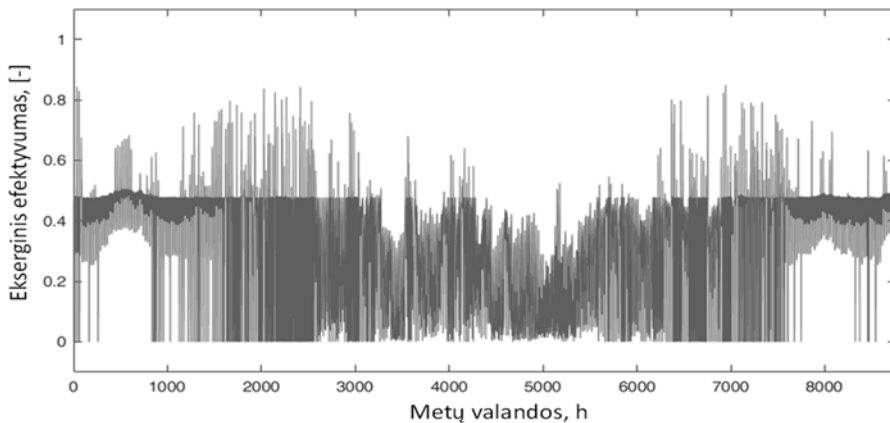
Siekiant įvertinti sistemos TSE rodiklį, dinaminio energijos poreikių modeliavimo įrankiu IES VE generuoti pastato rodikliai agreguojami taikant 2.1. poskyryje aprašytas išraiškas, apibrėžiančias energinės paslaugos poreikius eksergijos kiekiu ir transformuojant šioms funkcijoms tenkinti suvartojamus eksergijos srautus. Sistemos modelis TRNSYS programoje pateikiamas 3.3 paveiksle.



3.3 pav. Termohidrodinaminių kontūrų sistemos modelis TRNSYS aplinkoje
Fig. 3.3. System of thermohydrodynamic loops model in TRNSYS environment

Schemoje matomi esminiai modelio elementai – makro elementas („Sistema“), aprėpiantis sistemos funkcionalumą, elementai, imituojantys pastato energijos poreikius šildyti pastato patalpas, vėdinti tiekiant pašildytą orą, ruošti karštą vandenį, vėsinti ir vėdinti patalpas tiekiant atvėsintą orą. Poreikiai apskaičiuojami IES VE programa, kurios išvesties duomenys naudojami, kai įvestis TRNSYS elementams, imituojantiems energinių paslaugų poreikius. Imitacinis modeliavimas atliekamas naudojantis analogišku klimato dokumentu, kaip ir IES VE aplinkoje. Atliktos simuliacijos rezultatai išvedami į tekstinį dokumentą ir perduodami toliau apdoroti MATLAB aplinkoje.

Iš gautų eksergijos srautų išreiškiami momentiniai termodinaminio efektyvumo rodikliai kiekvienam laiko žingsniui. Rezultatas laikomas validžiu, jei efektyvumo išraiškos tenkina balanso lygčių sąlygas ir yra intervale 0–1. Apskaičiuotas rodiklis pateikiamas 3.4 paveiksle.



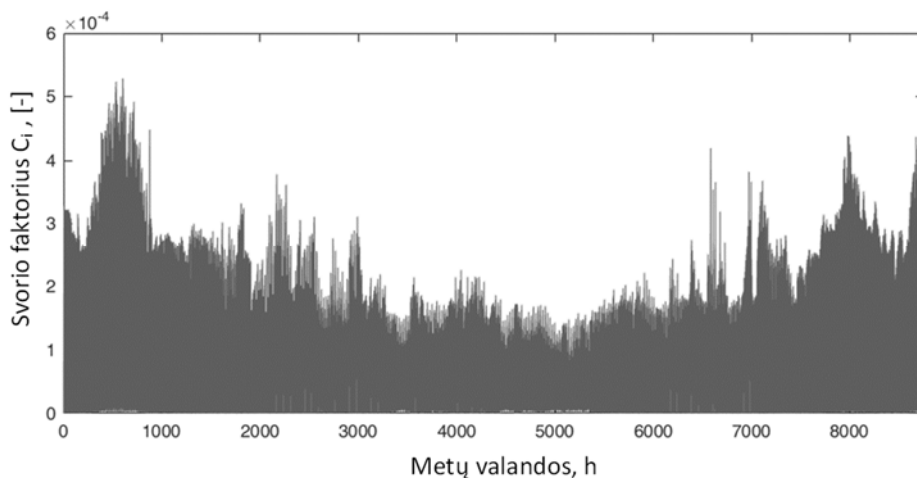
3.4 pav. Sistemos termodinaminio efektyvumo kitimas per metus

Fig. 3.4. System thermodynamic efficiency variation during a year

Pateiktame ekserginio efektyvumo kitime (3.4 pav.) galima identifikuoti ekstremumus (maksimali vertė 0,82; minimali – 0,0) ir vizualiai identifikuoti, kad šiltuoju metų laiku ekserginis efektyvumas svyruoja mažesniu intervalu, o šaltuoju metų laiku – didesniu. Tai gali lemti apsupties temperatūros ir šiluminiam komfortui užtikrinti reikalingos temperatūros santykis. Nemenką poveikį gali turėti kiekvienu laiko žingsniu funkcionuojančio posisteminio efektyvumai. Iš turimos analizės rezultatų nėra galimybės objektyviai įvardyti kitimo priežastis, todėl esant poreikiui pateikti detalesnes išvadas, reikalinga atlikti gilesnio lygio (posistemių lygmenyje L2) analizę.

Siekiant nustatyti termodinaminį sezoninį efektyvumą pagal 2.3. poskyryje aprašytą eigą iš agreguotų eksergijos srautų, išreiškiamas svorio rodiklis C_i .

Pastarasis naudojamas išreikšti atskiro laiko žingsnio daromą poveikį sezoniniam rodikliui. Apskaičiuotas dydis pateiktas paveiksle (3.5 pav.).



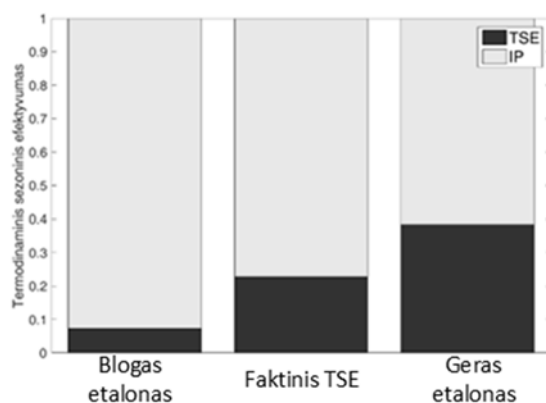
3.5 pav. Termodinaminio sezoninio efektyvumo rodiklio
svorio faktoriaus kitimas per metus

Fig. 3.5. Thermodynamic seasonal efficiency parameter weight variation across the year

Rezultatuose (3.5 pav.) matoma, kad svorio faktorius įgauna didžiausias reikšmes žiemos mėnesiais, o mažiausias – vasaros. Toks kitimas gaunamas dėl eksergijos srautų, reikalingų tenkinti pastato energines paslaugas, kitimo dinamikos. Galima atkreipti dėmesį, kad energijos srautai pagal kiekius, pateikiamus 3.2 pav., yra didžiausi vasaros mėnesiais. Pastebimas poreikis atlikti sistemų efektyvumo analizę ne tik pagal energijos suvartojimo pikus, tačiau ir pagal energijos kokybės lygmenį indikuojančius rodiklius.

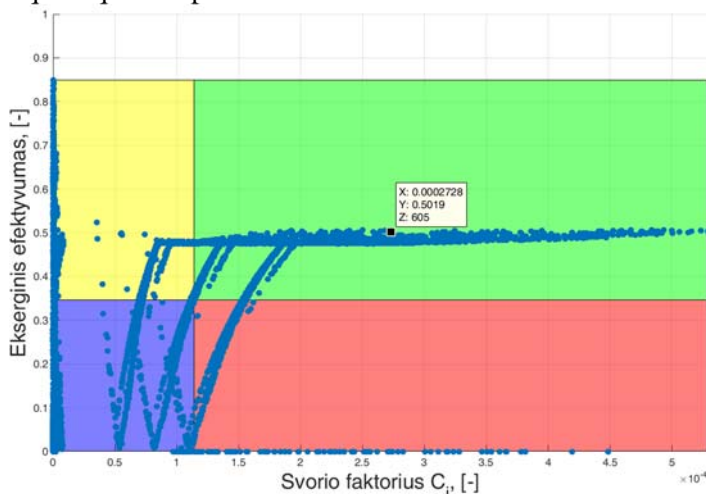
Susumavus šių dydžių (ekserginio efektyvumo ir svorio faktoriaus) produktą kiekvienu laiko žingsniu, gaunamas termodinaminio sezoninio efektyvumo dydis, išreiškiantis energijos kokybės išnaudojimo laipsnį nagrinėjamoje sistemoje per visą nagrinėjamą laikotarpį. Kaip buvo identifikuota atliktoje literatūros analizėje, šis dydis turi tiesioginę sąsają su sistemos tvarumo laipsniu.

Tam, kad būtų galima suvokti TSE rodiklio dydį, reikalinga intuityvi indikacija, kai rodiklio vertės yra „geros“, o kuriais atvejais artėjama prie „blogos“ vertės. Siekiant inspiruoti analizę atliekančio specialisto supratimą apie galimus analizuojamos sistemos rodiklių vertes, suformuojama atskaitos sistema, pasitelkiant etalonines sistemas. Rodikliai apskaičiuojami pagal 2.3.4 skirsnyje pateiktą formuluotę, kuri yra detaliau paaiškinta *H priede*. Likusi vieneto dalis nuo TSE yra traktuojama kaip tobulinimo potencialas (IP) pagal Van Gool (1997).



3.6 pav. Skaičiuojamojo atvejo palyginimas su etalonais
Fig. 3.6. The comparison between benchmark and calculated case

Lyginant su etalonais, galima identifikuoti, kad sistemos efektyvumas nėra artimas blogiausiam galimam termodinaminiam efektyvumui. Tačiau atotrūkis tarp analizuojamos ir „gero“ etalono yra gana ryškus – siekia 2,14 karto. Tai leidžia teigti, kad nagrinėjamos sistemos TSE rodiklis gali būti pagerintas koreguojant principinius sprendimus.



3.7 pav. Prioriteto faktoriaus grafinė interpretacija
Fig. 3.7. Graphical representation of priority factor setting

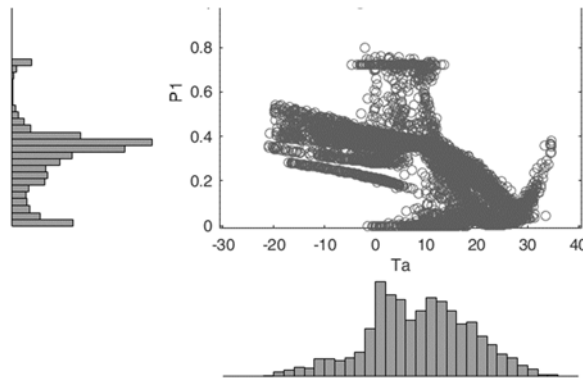
Identifikuojant kritinius sistemos funkcionavimo periodus ir nustatant prioritetus, siekiant nuodugniau nagrinėti sistemos funkcionavimą, pateikiama

grafinė laiko žingsnių vertes reprezentuojantis momentinių termodinaminių efektyvumų ir TSE svorio faktorių santykis.

Prioriteto faktorius P1 išreiškiamas pagal 2.3 poskyryje aprašytas procedūras. Paveiksle (3.7 pav.) matomi taškai, patenkantys į žalią zoną (aukštas ekserginis efektyvumas ir didelė svorio faktoriaus vertė), indikuoja apie sistemos funkcionavimo momentus, kurie turi teigiamą poveikį sistemos TSE rodikliui. Dėmesys turi būti atkreiptas į raudoną zoną, kurioje patenka momentai, kai sistemos efektyvumas yra žemas ir svorio faktoriaus vertė yra didelė. Šie taškai gauna didesnį prioriteto faktorių (P1) detalesniam nagrinėjimui. Geltona ir mėlyna zonos nepatenka į prioritetines dėl mažos svorio faktoriaus vertės.

Dėl pastato energijos poreikių sąsajos su apsupties sąlygomis galima suformuoti principinę prioriteto faktoriaus (3.8 pav. žymima P1) ir apsupties sąlygų (3.8 pav. žymima T_a) priklausomybę. Pasinaudojant šia grafine interpretacija, sudaroma galimybė susieti išorines apsupties sąlygas su analizuojamos sistemos prioriteto faktoriu ir grafiškai (3.8 pav.) identifikuoti kritinį kraštinių sąlygų periodą.

Pagal tendencijas, matomas grafike (3.8 pav.). Galima identifikuoti, kad didžiausios prioriteto vertės susidaro esant išorės oro temperatūrai (T_a) tarp -2 ir $+12$ °C. Šis intervalas taip pat sutampa su didžiausia kumuliacine išorės oro temperatūrų trukmės intervalu per metus Lietuvos klimatinėmis sąlygomis. Tačiau svarbu atkreipti dėmesį, kad dėl didelės šių sąlygų trukmės mažesnį prioriteto faktorių turinčių komponentų kumuliacinė vertė verčia atkreipti dėmesį į šį kraštinių sąlygų periodą (T_a [-2 ; $+12$] °C), kuriame tikslingas termohidrodinaminių sistemų optimizavimas.



3.8 pav. Prioriteto faktoriaus sąsaja su apsupties temperatūra

Fig. 3.8. Priority factor relation to ambient temperature

Pasinaudojant šiame analizės etape surinkta informacija, galima identifikuoti, kad nagrinėjama sistema pasižymi šiais rodikliais:

- termodinaminis sezoninis efektyvumas nagrinėjamai sistemai yra $TSE = 0,228$;
- vidutinis kiekvieno laiko žingsnio termodinaminis efektyvumas ($\bar{\eta}_{II} = 0,3843$) nėra tapatus TSE rodikliui;
- nagrinėjamos sistemos efektyvumas yra 2,14 karto mažesnis už „geros“ sistemos etalono TSE, tačiau 3,15 karto geresnis už „blogos“ sistemos etaloną;
- sistemos momentiniai efektyvumai svyruoja intervalu nuo 0 iki 0,78 su trumpalaikiais efektyvumo šuoliais iki 0,8, kurie susidaro posistemų įsijungimo metu;
- nustatytas prioriteto faktorius identifikuoja kritinius laiko žingsnius, kuriuose atliekami korekciniai veiksmai yra tikslingiausi, nes turi didžiausią poveikį TSE rodikliui;
- prioriteto faktoriaus ir išorės oro temperatūros tarpusavio sąsajos analizė atskleidžia, kad sistemai kritiškiausias periodas yra tarp $-2,0$ ir $+12,0$ °C temperatūrų. Siekiant padidinti sistemos efektyvumą, tikslinga detaliau nagrinėti šių išorės oro temperatūrų intervalą.

Ši turima informacija nesukuria galimybės iš esmės koreguoti sistemos TSE rodiklio, tačiau leidžia suvokti galimas kitimo ribas, kritinius funkcionavimo periodus ir skirtumą nuo etaloninių sistemų. Esminiai keitimai sistemos vidinėje konfigūracijoje – posistemiuose – yra atliekami atlikus analizę kitame detalumo lygyje.

Kadangi suformuotas integruotas termodinaminės analizės metodas numato iteracijas – šis proceso etapas (L1) yra kartojamas su visais atvejais atlikus pakeitimus bet kuriame analizės detalumo lygyje. Tokiu būdu kiekviena sistemos variacija yra matoma kaip galima alternatyva galutiniam sprendimų rinkiniui, kuris yra priimamas pasitelkiant prioriteto faktorių P0. Jei pradinėje stadijoje yra nagrinėjamos kelios sistemų alternatyvos, P0 prioriteto faktoriumi iš alternatyvų yra pasirenkama sistemos kombinacija, turinti didžiausią termodinaminį sezoninį efektyvumą.

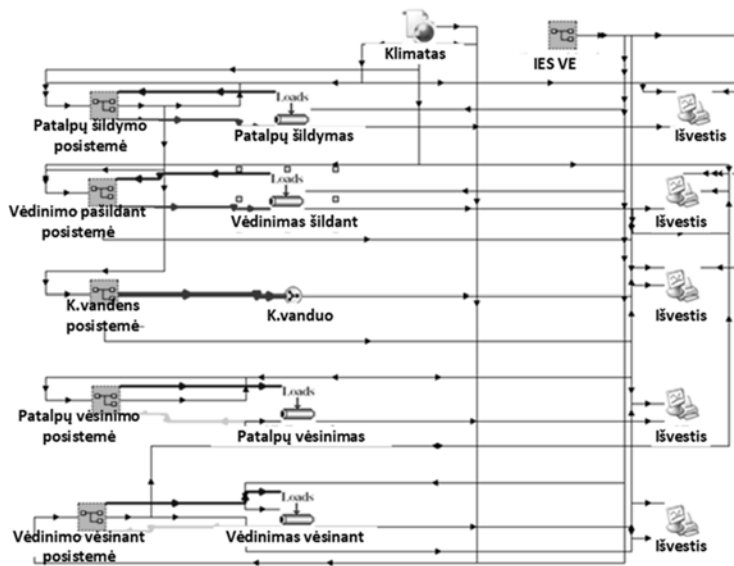
Suformuotų sistemos alternatyvų palyginimas ir prioriteto nustatymas pasitelkiant P0 faktorių yra pateikiamas formuojant galutines išvadas.

3.2.2. Posistemų lygmenyje (L2) atliekama analizė

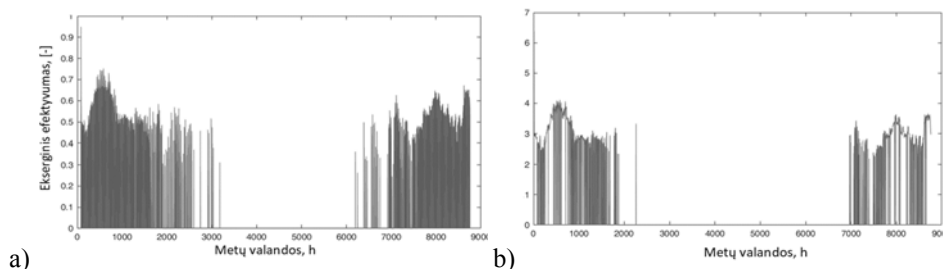
Atlikus analizę sistemos lygmenyje, gali būti priimamas sprendimas diegti esamą sistemos konfigūraciją arba, jei netenkinami tiksliniai rodikliai arba yra siekiama surasti didesnę termodinaminį sezoninį efektyvumą turinčią alternatyvą, atliekama

detalesnė analizė posistemių lygmenyje. Sistemos modelis, suskaidytas į posistemius, TRNSYS modeliavimo aplinkoje pateikiamas 3.9 paveiksle.

Tam, kad būtų nustatytas kiekvieno posistemo TSE, sistema suskaidoma į posistemius pagal teikiamas energines paslaugas. Nustatomos kiekvieno posistemo skiriamosios ribos, kurios analizės kontekste įvardijamos kaip kontrolinis tūris. Apskaitomi masės ir energijos srautai, kertantys kontrolinio tūrio ribas, ir pagal 2.2 poskyryje aprašytas procedūras konvertuojami į eksergijos srautus.



3.9 pav. Sistemą sudarančių posistemių modelis TRNSYS modeliavimo aplinkoje
Fig. 3.9. TRNSYS model of system combined from sub-systems

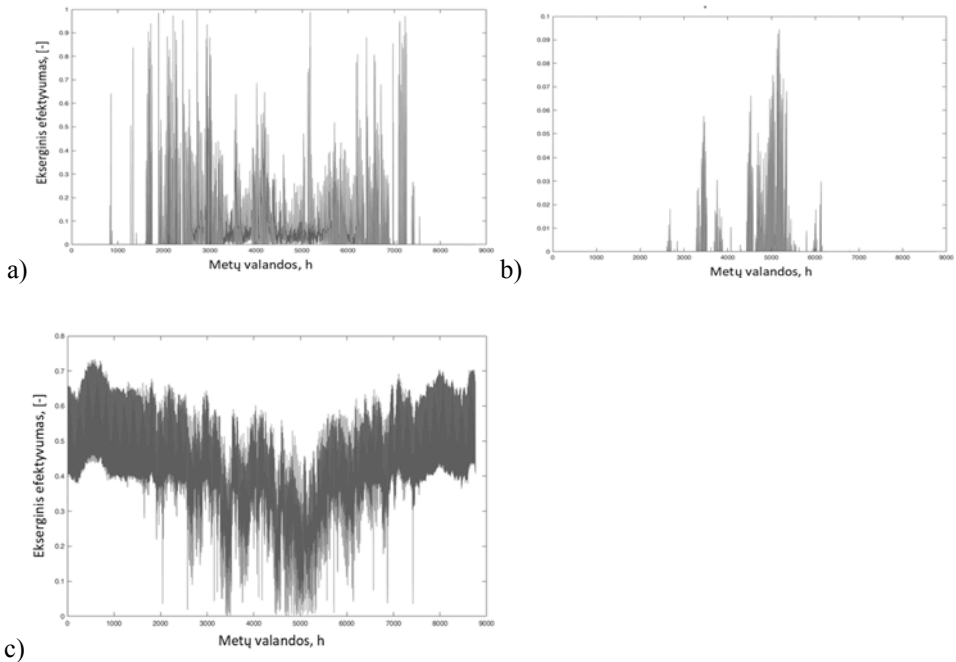


3.10 pav. Sistemą sudarančių posistemių termodinaminio efektyvumo kitimas:

a) patalpų šildymo posistemės, b) vėdinimo sistemos šildymo režimu

Fig. 3.10. Thermodynamic efficiency variation of separate subsystems:

a) space heating and b) ventilation pre-heating subsystems



3.11 pav. Sistemą sudarančių posistemų termodinamino efektyvumo kitimas:

- a) patalpų vėsinimo posisemis; b) vėdinimo sistemos vėsinimo režimu;
c) karšto vandens ruošimo posistemio

Fig. 3.11. Thermodynamic efficiency variation of separate subsystems: a) space cooling subsystem; b) ventilation pre-cooling and c) domestic hot water subsystem

Kiekvieno posistemio atveju analizė atlikta analogiškai kaip ir sistemos atveju – energinę paslaugą užtikrinti reikalingi ir šiai funkcijai atlikti sunaudojami eksergijos srautai agreguojami išreiškiant momentinius termodinaminius efektyvumus. Momentinio ekserginio efektyvumo rodiklių kitimas atskiriems posistemiams pateikiamas 3.10 ir 3.11 paveiksluose.

Iš atliktos termodinaminės analizės rezultatų posistemų (L2) lygmenyje galima įvardyti atskirų posistemų efektyvumus ir kitus jų rodiklius:

- patalpų šildymo posistemio efektyvumas kinta intervalu nuo 0 iki 0,76. Efektyvumo rodiklis yra prilyginamas 0, kai posistemis neveikia. Didžiausias momentinis efektyvumas yra pasiekiamas, kai tarp šildymo sistemos ir apsupties temperatūrų susidaro didžiausias skirtumas;
- vėdinimo posistemio, veikiančios šildymo režimu, efektyvumas kinta nuo 0 iki 0,42. Didžiausią efektyvumą sistema pasiekia analogiškais sąlygomis kaip ir patalpų šildymo posistemis.

Posistemio efektyvumas yra mažesnis dėl ventiliatorių elektros energijos poreikių;

- patalpų vėsinimo posistemio efektyvumas kinta intervalu nuo 0 iki 0,97. Aukščiausias efektyvumas yra pasiekiamas, kai reikalingas patalpų vėsinimas pereinamuoju laikotarpiu. Esant didžiausioms apkrovoms ir aukštoms apsupties temperatūroms, krenta šaldymo mašinos efektyvumas (dėl padidėjusio temperatūrų skirtumo tarp reikalingo tiekiamo šilumnešio ir apsupties oro temperatūrų), todėl posistemio efektyvumas gerokai sumažėja;
- vėdinimo posistemis, veikiantis šildymo režimu nuo 0 iki 0,095 – tai mažiausia efektyvumą turintis posistemis dėl ventiliatorių ir šalčio gamybos įrenginių elektros energijos poreikių ir santykinai mažo atnešamo eksergijos srauto (tiekiamo oro temperatūra yra artima apsupties temperatūrai);
- karšto vandens ruošimo posistemis – nuo 0 iki 0,73 priklausomai nuo apsupties temperatūros kitimo. Didžiausios vertės pasiekiamos esant ekstremalioms neigiamoms temperatūroms, mažiausios – esant ekstremalioms teigiamoms temperatūroms.

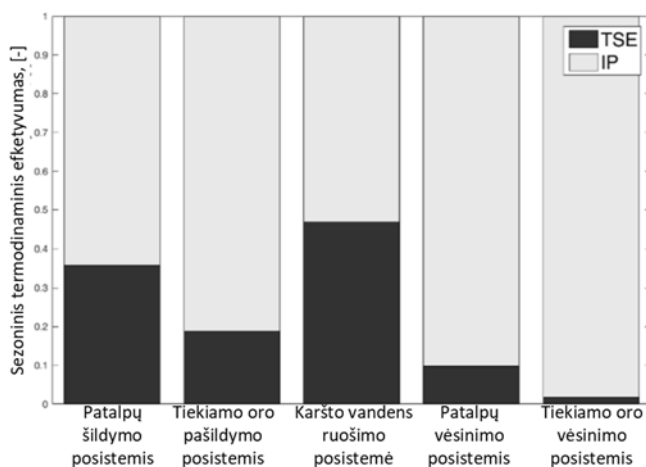
Kiekvieno posistemio atveju, pasinaudojant gautu ekserginio efektyvumo kitimu ir ekserginiais srautais, kiekvienam laiko žingsniui išreiškiami TSE ir C_i svorio faktoriai. Šie veiksmai atliekami analogiškai kaip ir sistemos (L1) lygmenyje taikant metodiką, pritaikytą kontrolinio tūrio ribojamos sistemos efektyvumo išraiškai.

Apskaičiavus šiuos rodiklius, gaunami kiekvieno posistemio sezoninį funkcionavimą reprezentuojantys TSE rodikliai kiekvienam sistemą sudarančiam posistemiiui. Posistemių TSE rodikliai pateikiami 3.12 paveiksle.

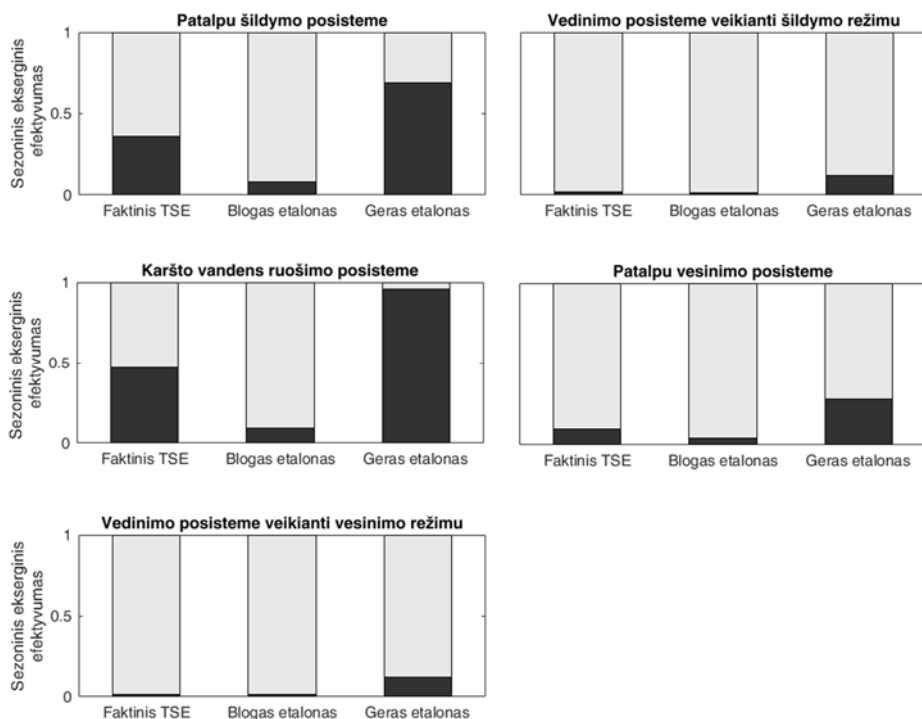
Posistemių TSE rodikliai gali būti sugretinami su etaloninėmis vertėmis, reprezentuojančiomis konkrečių posistemių „gerą“ ir „blogą“ TSE. Kaip ir sistemos lygmens analizės (L1) atveju, šis palyginimas sukuria galimybę konceptualiai suvokti, kokios priemonės ir sprendimai turėtų būti pritaikomi siekiant pagerinti sistemos sezoninį našumą pagal TSE rodiklį. Palyginimas tarp faktinės posistemių TSE vertės ir etaloninių posistemių rodiklių pateikiamas 3.13 paveiksle.

Palyginus posistemių efektyvumą su „geros“ ir „blogos“ analogiškų posistemių etalonais, galima įvardyti:

- patalpų šildymo posistemio atveju faktinės sistemos efektyvumas yra 2,2 karto didesnis už „blogo“ etalono vertės, tačiau „geros“ sistemos etalonas yra 2,89 karto didesnis;
- vėdinimo posistemio, veikiančio šildymo režimu, atveju atitinkamai 1,3 karto didesnis už „blogos“ sistemos etaloną, „geros“ sistemos etalonas yra 7,15 karto;



3.12 pav. Posistemų termodinaminio sezoninio efektyvumo rodikliai
Fig. 3.12. The thermodynamic seasonal efficiency parameters of subsystems



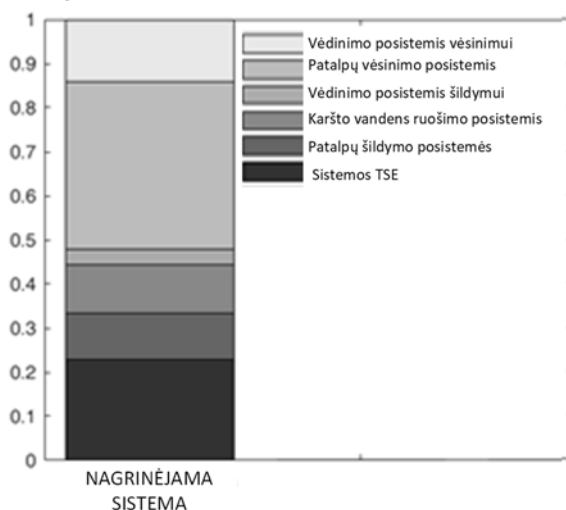
3.13 pav. Faktinio ir etaloninių posistemų efektyvumų palyginimas
Fig. 3.13. The comparison between actual and benchmark efficiencies

- karšto vandens ruošimo posistemio atveju – 4,35 didesnis už „blogą“ etaloną ir 1,93 karto mažesnis už „gerą“ etaloną;
- patalpų vėsinimo posistemio atveju – 3,09 didesnis už „blogą“ etaloną ir 4,17 mažesnis už „gerą“ etaloną;
- vėdinimo sistemos posistemis, veikiančio vėsinimo režimu, atveju – 5,14 didesnis už „blogą“ etaloną ir 2,04 mažesnis už „gerą“ etaloną.

Toks posistemių palyginimas leidžia suprasti faktines posistemių tobulinimo galimybių ribas, atkreipia dėmesį į sprendimus, leidžiančius padidinti sistemų efektyvumą (taikant „geram“ posistemio etalonui suformuoti naudojamus techninius sprendimus. Taip pat atkreipiamas dėmesį į techninius sprendinius, kurie yra žalingi TSE rodikliui ir formuoja poreikį vengti scenarijų, panaudotų „blogų“ posistemių etalonuose.

Siekiant nustatyti, kuri iš nagrinėjamų, sistemą sudarančių posistemių turi didžiausią neigiamą poveikį viso energinių paslaugų rinkinio teikimo efektyvumui, apskaičiuojamas sunaikintos eksergijos proporciją išreiškiantis faktorius D. Grafinė šio dydžio interpretacija integruojant sunaikintos eksergijos proporcinį faktorių į TSE rodiklį pateikiama 3.14 paveiksle.

Teorinis tobulinimo potencialas (IP) gali būti suskaidomas pagal kilmę, atsižvelgiant į sunaikintos eksergijos kiekį kiekviename posistemyje. Tokiu būdu galima identifikuoti, kuris posistemis labiausiai riboja sistemos galimybes turėti aukštesnį TSE rodiklį.



3.14 pav. Sistemos termodinaminio sezoninio efektyvumo rodiklio struktūra atsižvelgiant į posistemių sukuriamą poveikį

Fig. 3.14. The structure of system thermodynamic seasonal efficiency parameter including the influence of subsystems

Iš šio 3.14 paveikslo matyti, kad didžiausią poveikį sistemos efektyvumui turi patalpų vėsinimo posistemis ($D = 0,38$). Galimybės padidinti šios posistemo efektyvumą turi būti svarstomos mažinant pagamintos entropijos kiekį. Galimų šią problemą sprendžiančių alternatyvų pasirinkimas šiam posistemui yra analizuojamas šiame ir tolesniuose atvejo analizės poskyriuose. Šios sistemos neigiamą poveikį galima paaiškinti didžiausia sunaikintos eksergijos dalimi – 49 % nuo visos sistemos sunaikinto eksergijos kiekio.

Išreitingavus sistemas pagal sukuriamą neigiamą poveikį visos sistemos TSE rodikliui, gali būti sudarytas toks posistemių daromos įtakos eiliškumas: Patalpų vėsinimo posistemis (49 %), Vėdinimo posistemis, veikiantis vėsinimo režimu (18 %), Vėdinimo posistemis, veikiantis šildymo režimu (14 %), patalpų šildymo posistemis (14%) ir karšto vandens ruošimo posistemis (5 %). Bendroju atveju sistemos TSE rodiklis yra pagerinamas, kai atskirų posistemių kontekste yra mažinamas sunaikintos eksergijos kiekis (arba mažinamas pagamintos entropijos kiekis).

Siekiant skaitinėmis vertėmis išreikšti posistemių daromą poveikį sistemos TSE, naudojamas prioriteto faktorius P_2 , kuriuo atskiri posistemiai gali būti reitinguojami pagal daromą įtaką galutiniam rezultatui. Šis prioriteto faktorius apskaičiuojamas pagal metodiką, nurodytą 2.5 poskyryje.

Identifikavus didžiausią poveikį sistemos efektyvumui turinčius posistemių, galima atlikti nuodugnesnę posistemo analizę. Analogiškai sistemos lygmens analizei, gali būti išreiškiama momentinių efektyvumų ir svorio faktorių priklausomybė. Posistemių faktiniai ir etaloniniai efektyvumai bei prioriteto faktorius tolesnei analizei pateikiamas 3.2 lentelėje.

Galima identifikuoti metodikos plėtote atrinkus kritinius periodus, pasitelkiant prioriteto faktorių identifikuoti laiko žingsniai, kuriuose tikslinga tobulinimų paieška, posistemo lygmenyje gali būti sugretinama su kritiniais periodais sistemos lygmenyje. Tokiu būdu sukuriama nuoseklus ryšys tarp identifikuotų trukdžių pasiekti aukštesnį termodinaminį efektyvumą tarp skirtingų detalumo lygmenų.

Atlikus analizę šiame detalumo lygyje, galima identifikuoti šiuos aspektus:

- didžiausią neigiamą poveikį sistemos efektyvumui turi patalpų vėsinimo posistemis, sukuriantis didžiausius eksergijos nuostolius;
- aukščiausią TSE rodiklį turi karšto vandens ruošimo posistemis, naudojantis centralizuotus šilumos tinklus kaip šiluminės energijos šaltinį – 0,4689;
- žemiausią TSE rodiklį turi tiekiamo oro vėsinimo funkciją atliekantis posistemis – 0,0168;
- posistemis, atliekantis patalpų ir tiekiamo oro vėsinimo funkcijas turi gerokai mažesnę TSE rodiklį. Nuo 2 iki 3,5 kartų, nei posistemis, atliekantis šildymo funkciją.

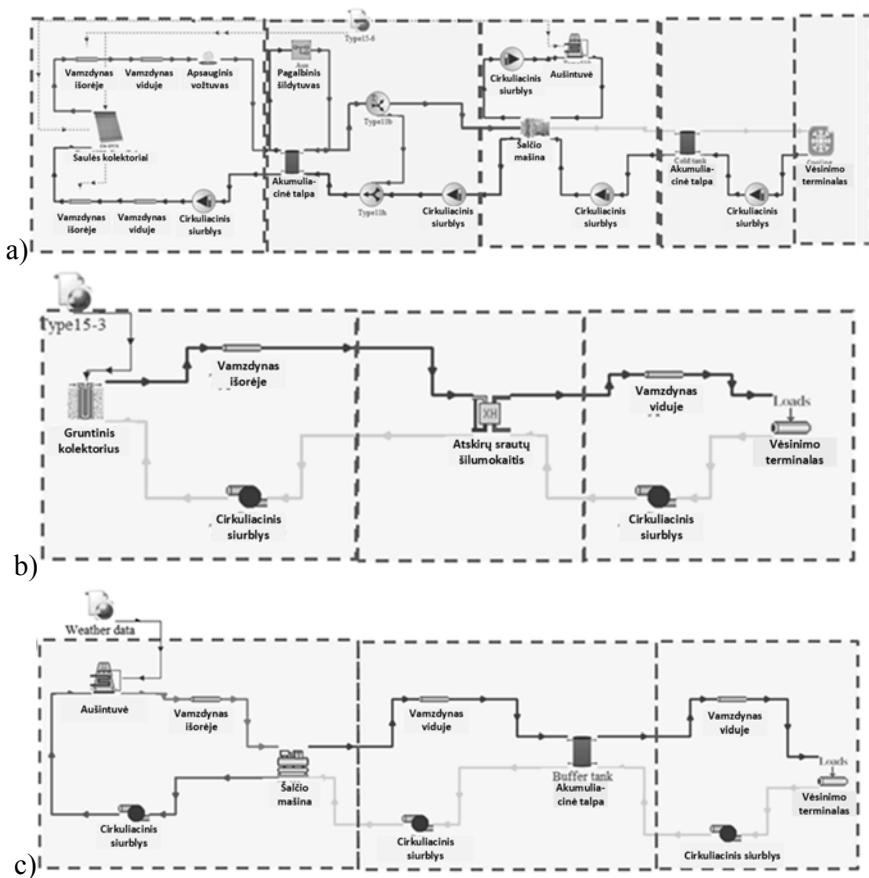
3.2 lentelė. Posistemių termodinaminis sezoninis efektyvumas ir prioriteto faktorius P2
Table 3.2. The thermodynamic seasonal efficiency parameter of subsystems and priority factor P2

Posistemiai	Posistemių TSE rodiklis			P2
	Faktinė vertė	„Blogas“ etalonas	„Geras“ etalonas	
Patalpų vėsinimo (SC)	0,0975	0,0438	0,2818	0,822
Tiekiamo oro vėsinimas (AHU_C)	0,0168	0,0126	0,1202	1,000
Patalpų šildymo (SH)	0,3580	0,0822	0,6912	0,245
Tiekiamo oro šildymas (AHU_H)	0,1883	0,0608	0,7860	0,621
Karšto vandens ruošimas (DHW)	0,4689	0,0912	0,9597	0,000

Jeigu yra žinomos alternatyvos kritinėms pozicijoms, šios gali būti nepriklausomai įvertintos išreiškiant TSE. Alternatyvos tarpusavyje gali būti palyginamos šiuo rodikliu, o jų eiliškumas gali būti išreikštas pasitelkiant prioriteto faktorių P0.

Kompresorinės vėsinimo sistemos, turinčios didžiausią poveikį sistemos termodinaminiam efektyvumui, gali būti koreguojamos pagal didesnio detalumo analizės rezultatus arba pakeičiamas į galimas alternatyvas. Alternatyvus posistemiai gali būti generuojami konkrečiai pozicijai arba pritaikant turimus posistemių dinaminis modelius. Šio darbo kontekste pradinė sistema (kompresorinė vėsinimo sistema) yra palyginama su dviem alternatyvomis, naudojančiomis skirtingus principinius sprendimus: adsorbcinio vėsinimo technologiją ir geologinės stovymės ir apsupties temperatūros skirtumą išnaudojančią sistemą. Šių sistemų koncepcinės TRNSYS schemas pateikiamos 3.15 paveiksle.

Atlikus šių posistemių analizę, gali būti palyginami alternatyvų TSE rodikliai. Pritaikius P0 prioriteto faktorių, identifikuojamas posistemis, kurio diegimas yra tiksliausias siekiant padidinti visos sistemos TSE rodiklį.



3.15 pav. Vėsinimo sistemų alternatyvų koncepcinės schemas su:

a) adsorbcine šalio mašina; b) pasyvaus vėsinimo iš gręžskylės;

c) su kompresorine šalio mašina

Fig. 3.15. Conceptual schemes of space cooling system alternatives:

a) with adsorption chiller; b) with passive borehole cooling;

c) with compressor cooling machine

Prioriteto faktoriaus vertės reprezentuoja ne tik prioriteto eilė – faktorių vertės reprezentuoja normalizuotą skirtumą tarp atskirų alternatyvų. Toks pateikimas leidžia suprasti, kaip žemesnį prioritetą turinčios alternatyvos yra nutolusios nuo geriausios alternatyvos, nurodytos 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Vėsinimo posistemio alternatyvų efektyvumas ir prioriteto faktorius
Table 3.3. The efficiencies of space cooling subsystem alternatives and priority factor

Posistemio opcijos	Posistemio TSE	Prioriteto faktorius P0
Kompresorinės šaldymo mašinos aptarnaujama vėsinimo sistema (C posistemis 3.14 pav.)	0,0975	0,000
Geologinės storymės pasyviai vėsinama sistema (B posistemis 3.14 pav.)	0,786	1,000
Adsorbcinės šalčio mašinos aptarnaujama vėsinimo sistema (A posistemis 3.14 pav.)	0,124	0,0384

Pagal šiuos rodiklius tikslingiausia nagrinėti posistemę, turinčią didžiausią prioriteto faktorių ir galinčią užtikrinti nepertraukiamą funkcionavimą esant poreikiui. Pakeitus esamą posistemį į alternatyvą B (Geologinės storymės pasyviai vėsinama sistema), visos sistemos TSE rodiklis pasikeičia iš 0,228 į 0,360 (1,578 karto). Tarpusavyje nesusietų posistemų efektyvumo pasikeitimas gali būti preliminarai apskaičiuotas neatliekant sistemos dinaminio modeliavimo (esant tarpusavyje nesusijusiems posistemiams). Šis rodiklio pokytis apskaičiuotas atsižvelgiant į energijos tiekimo grandinių srautus. Jei sistema būtų koreguojama įtraukiant adsorbcinės šalčio mašinos posistemis patalpų vėsinimui, TSE rodiklis pasikeistų iš 0,228 į 0,298 (1,307 karto).

Iš atliktų analizės rezultatų nėra galimybės įvardyti iki kokios ribos gali būti padidintas alternatyvų termodinaminis efektyvumas. Dėl šios priežasties tolesniuose analizės etapuose lygiagrečiai nagrinėjamos ir kitos alternatyvos, turinčios mažesnį prioriteto faktorių.

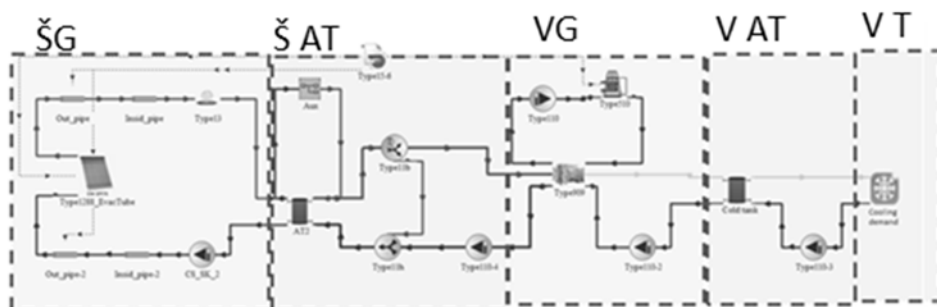
3.2.3. Komponentų grupių lygmenyje (L3) atliekama analizė

Atlikus analizę posistemų lygmenyje, buvo identifikuotos individualios energinių paslaugų tiekimo grandinės (posistemio), turinčios kritinį poveikį visos sistemos TSE rodikliui. Siekiant nustatyti, kurios komponentų grupės sukuria termodinامينius negrįžtamumus, lemiančius tokį poveikį, ir klasifikuoti jų kilmę, atliekama tolesnė analizė.

Kiekvienos komponentų grupės momentinis efektyvumas, TSE rodiklio svariniai koeficientai išreiškiami analogiškai ankstesniuose analizės etapuose taikytiems principams. Siekiant identifikuoti negrįžtamumus lemiančius antrosios alternatyvos efektyvumą, atliekama detalesnė adsorbcinės šalčio mašinos aptarnaujamos sistemos analizė.

Imitacinio modeliavimo programoje TRNSYS sudarytos vėsos gamybos posistemio alternatyva (posistemis su adsorbcine šaltio mašina) yra suskaidomas į komponentų grupes, kaip parodyta 3.16 paveiksle.

Suskaidžius sistemą į komponentų grupes, nustatomas kiekvienos iš jų efektyvumo kitimas pagal ekserginių srautų santykį. Esminių (VG ir VT) grupių efektyvumo kitimas pateikiamas paveiksle 3.17 paveiksle.



3.16 pav. Vėsinimo posistemis su adsorbcine šaltio mašina modelio

TRNSYS aplinkoje suskaidymas į komponentų grupes.

Čia: „ŠG“ – šilumos gamybos komponentų grupė; „ŠAT“ – šilumos akumuliavimo grupė; „VG“ – vėsos gamybos grupė; „VAT“ – vėsos akumuliavimo grupė; „VT“ – vėsinimo terminalų grupė.

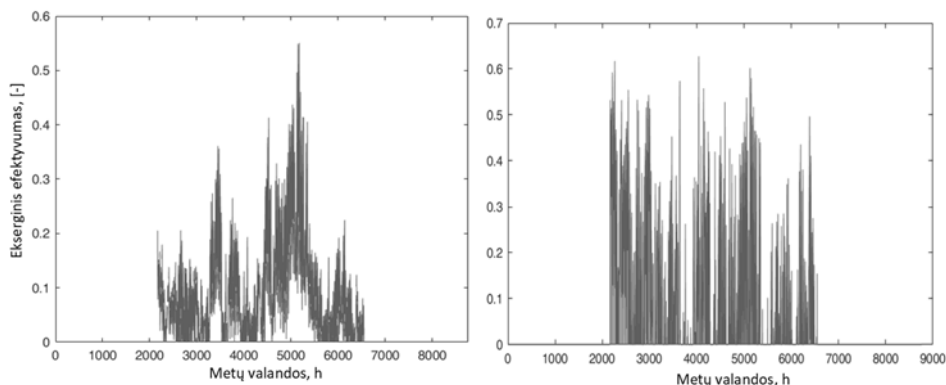
Fig. 3.16. Subdivision of TRNSYS model used for modeling cooling system with adsorption cooling machine

Iš ekserginio efektyvumo kitimo galima identifikuoti atskirų komponentų grupių rodiklių ekstremumus ir funkcionavimo tendencijas. Duomenys pateikiami 3.17 pav. nėra skirti tiesioginei analizei. Tačiau iš pateiktos kitimo tendencijos adsorbcinės šaltio mašinos grupės atveju galima identifikuoti, kad efektyvumas svyruoja nuo 0,0 (nesant vėsinimo poreikio arba susidarius specifiniam šilumnešio, apsupties ir patalpos temperatūrų santykiui) iki 0,57.

Vėsinimo terminalo grupės efektyvumas svyruoja nuo 0,00 (sąlygomis analogiškoms kaip ir šaltio mašinos atveju) iki 0,62. Galima identifikuoti tendenciją, kad dominuoja aukšto efektyvumo periodai, kuriuos nulemia mažas temperatūrų skirtumas tarp patalpos ir aušinančio šilumnešio temperatūrų.

Kitų komponentų grupių efektyvumo kitimas nustatytas taikant analogišką tvarką, gaunami duomenys yra naudojami tolesniuose analizės etapuose.

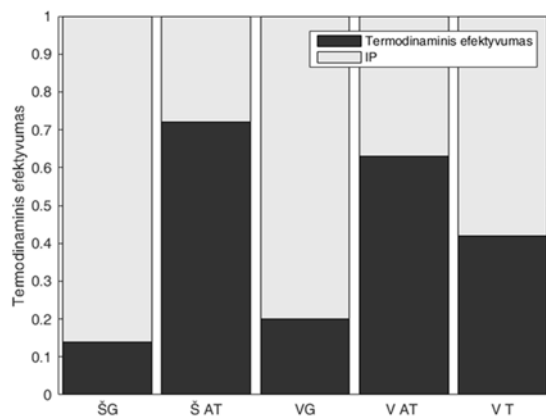
Apibendrinant termodinaminio efektyvumo rodiklių kitimą, pasitelkiant sezoninio rodiklio apskaičiavimo procedūras, kiekvienos grupės sezoninis efektyvumas yra išreiškiamas TSE rodikliu. Komponentų grupės apima pagrindinius komponentus ir juos aptarnaujančius termohidrodinaminius kontūrus su cirkuliaciniais siurbliais ir reguliavimo įranga.



3.17 pav. Komponentų grupių ekserginio efektyvumo kitimas – adsorbcinės šalčio mašinos VG (kairėje) ir vėsinimo terminalų grupė VT (dešinėje)

Fig. 3.17. The efficiency variation of separate groups of components – adsorption cooling component group (left) and cooling terminal group (right)

Kiekvienos komponentų grupės sezoninis efektyvumas, apskaičiuotas pagal 2.2 poskyryje aprašytą tvarką, pateikiamas 3.18 paveiksle.



3.18 pav. Komponentų grupių termodinaminis sezoninis efektyvumas

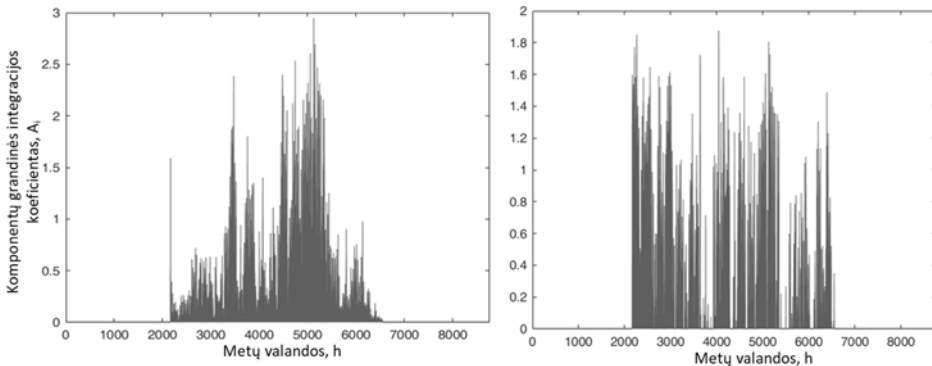
Fig. 3.18. Thermodynamic seasonal efficiency for groups of components

Analizuojamo posistemo TSE rodiklis yra sudėtinis komponentų grupių sezoninių efektyvumo rodiklių produktas. Priešingai nei sistemos – posistemo lygmenų efektyvumo sąveikoje, rodiklių sąsaja yra kompleksiškesnė ir jai išreikšti naudojamas papildomas grandinės efektyvumo integracijos koeficientas A_i . Šio koeficiento apskaičiavimo matematinė išraiška pateikiama 2.2 poskyryje.

Kiekvienai iš komponentų grupių šio koeficiento dydis ir kitimas skirtingas. Apskaičiuoti integracijos koeficientai pateikiami 3.19 paveiksle.

Integracijos koeficientų ir momentinių efektyvumo rodiklių sandaugos produktas išreiškia aukštesnio lygmens detalumo grupės (šiuo atveju – posistemo) efektyvumo kitimą.

Gaunamas integracijos koeficientas rodo, kokią svorį bendroje grandinės efektyvumo išraiškos sandaugoje turi komponentų grupė. Šie duomenys nėra skirti tiesioginiams komponentų grupių lyginimui. Šiais koeficientais atskirų komponentų grupių efektyvumų kitimas yra integruojamas į posistemo efektyvumą tokiu būdu užtikrinant nuoseklią termodinaminės sistemos TSE rodiklio išraišką.



3.19 pav. Integravimo koeficiento (A_i) kitimas – adsorbcinės šalčio mašinos (kairėje) ir vėsavimo terminalų grupė (VT) (dešinėje)

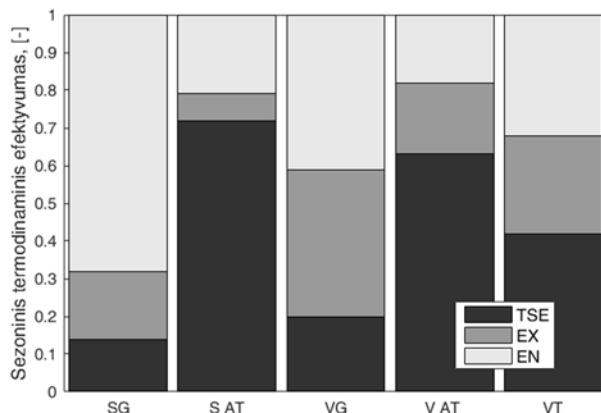
Fig. 3.19. The change of integration coefficient (A) – adsorption cooling component group (left) and cooling terminal group (right)

Pasinaudojant integracijos koeficientu, išreiškiamas posistemo efektyvumo rodiklis, kuris šiuo atveju yra lygus 0,124. Šis rodiklis gali būti panaudojamas integruojant posistemo efektyvumo rodiklį į visos sistemos TSE rodiklio išraišką.

Pagal 2.6. poskyryje aprašytą išplėstinės termodinaminės analizės metodiką, adaptuotą termohidrodinaminių kontūrų posistemo atvejui, yra gaunami rodikliai, kuriais sunaikintos eksergijos kiekis yra suskaidomas pagal vidinės ir išorinės kilmės veiksnys. Imitaciniam modeliavimui naudotas posistemo modelis TRNSYS aplinkoje (3.16 pav.) iliustruoja posistemo komponentų grupavimą.

Atlikus skaičiavimų ciklą, kai kiekvienos iteracijos metu yra koreguojami termodinaminį efektyvumą lemiantys rodikliai, gaunamas sunaikintos eksergijos kiekių rinkinys. Iš šio rinkinio, pagal 2.6 poskyryje aprašytą metodiką išreiškiamas eksergijos kiekis sunaikintas dėl išorinių veiksnių. Pritaikius balanso

principą, sunaikintas eksergijos kiekis yra suskaidomas į vidinių ir išorinių veiksnių sukeltus termodinaminius negrįžtamumus. Siekiant suprasti komponentų efektyvumo struktūrą lemiančius veiksnius, kiekvieno komponento termodinaminis efektyvumas yra atvaizduojamas grafike 3.20 pav., kuris praplečia šiame analizės lygmenyje sudarytą komponentų grupių efektyvumo išraišką (pateiktą 3.18 pav.).



3.20 pav. Komponentų grupių termodinaminio efektyvumo struktūra

Fig. 3.20. The structure of component group thermodynamic efficiencies

Pasinaudojant informacija, išgauta šiame lygmenyje – dėl vidinių (EN) ir išorinių (EX) veiksnių sunaikintu eksergijos kiekiu ir bendroju sunaikintos eksergijos kiekiu yra išreiškiami prioriteto faktoriai (pateikiami 3.4 lentelėje), nurodantys atskirų komponentų grupių keitimo arba detalesnio nagrinėjimo tikslingumą.

Paradoksalu, tačiau atskirų komponentų efektyvumo prieaugis gali neturėti teigiamo poveikio sistemos termodinaminiam efektyvumui, jeigu tai nesukelia pokyčio šilumos / vėsos šaltinio funkcionavimo temperatūroms. Kurą deginantys šilumos šaltiniai dėl technologinių apribojimų kombinacijoje su žema-temperatūriniais patalpų šildymo būdais negali pasiekti tokio termodinaminio efektyvumo, kurį gali turėti šaltinis, galintis tiekti šilumnešio temperatūrą adaptuoti pagal šildymo terminalų poreikį.

Dėl šiame darbe pritaiktų analizės ribų, kurios apsiriboja pastato ribomis, nėra nagrinėjama ir detalizuojama pastato ribą kertančių ir energinių paslaugų kilmė ir gamybos technologija. Atsižvelgiant į šį apribojimą, siekiant užtikrinti kuo efektyvesnę pastato ribą kertančių energijos srautų išnaudojimą, galima formuoti principinę rekomendaciją – šaltinio generuojamos / atiduodamos energijos kokybės lygis turi būti kaip įmanoma artimesnis energinei paslaugai sukurti reikalingam kokybės lygiui.

3.4 lentelė. Vidinių ir išorinių termodinaminių negrįžtamųjų pasiskirstymas
Table 3.4. Internal and external irreversibilities distribution

Komponentų grupė	EN	EX	P3
Šilumos gamybos grupė (SG)	0,68	0,18	1,00
Buferinės talpos grupė (S AT)	0,21	0,07	0,86
Šalčio mašinos grupė (VG)	0,41	0,39	0,043
Vėsos talpos grupė (V AT)	0,18	0,189	–0,041
Vėsinimo terminalų grupė (VT)	0,32	0,26	0,177

Suformuota rekomendacija yra tapati principams, kuriuos galima formuluoti remiantis Bejan (1996) pasiūlytu *thermal systems as insulation* analogijos modeliu. Remiantis šia analogija, yra įvardijama, kad siekiant sumažinti termodinaminių negrįžtamųjų generavimą, reikalinga sumažinti skirtumą tarp „karštų“ ir „šaltų“ rezervuarų. Energijos kokybės perteklius – aukštesnė temperatūra, nei reikalinga energinei paslaugai teikti (atsižvelgiant į termohidrodinaminių kontūrų grandinės kokybės nuostolius), nėra išnaudojamas. Esant kokybės pertekliui, TSE rodiklis yra žemesnis lyginant su atveju, kai poreikio ir generavimo kokybės lygiai sutampa arba yra artimi.

Atlikus analizę šiame detalumo lygyje, galima identifikuoti šiuos aspektus:

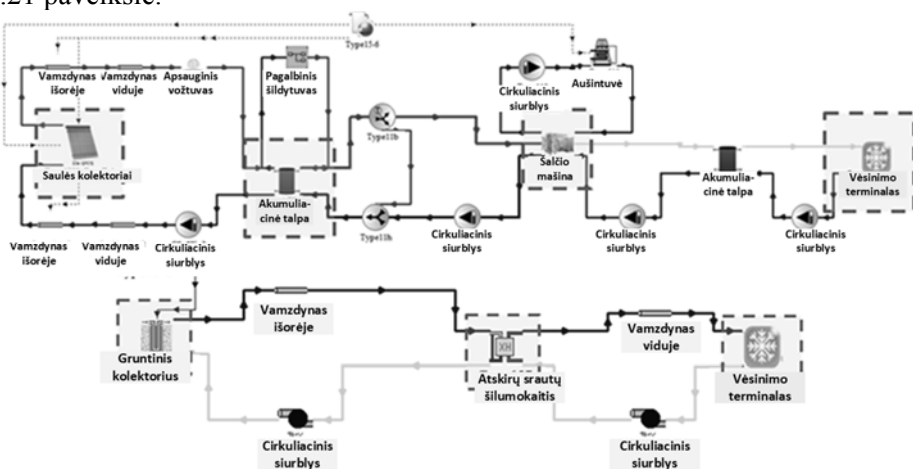
- vidinės ir išorinės kilmės termodinaminių negrįžtamųjų santykis nagrinėto posistemio komponentuose svyruoja nuo 0,28 iki 0,86;
- didžiausią poveikį kitiems komponentams pagal apskaičiuotą prioritetą faktorių turi šilumos gamybos posistemis, susidedantis iš saulės kolektorių ir rezervinio šilumos šaltinio (tiesioginis šildymas elektros energija);
- mažiausią neigiamą poveikį kitiems komponentams turi vėsos akumuliavimo komponentų grupė, kurioje dominuoja išoriniai termodinaminius negrįžtamumus sukeliantys veiksniai.

Pasinaudojant šia informacija, pasirenkama, kuriuose komponentų grupėse tikslinga atlikti detalesnę analizę siekiant nustatyti galimus tobulinimo sprendimus, didinančius sistemos termodinaminį efektyvumą nagrinėjamu laikotarpiu.

3.2.4. Komponentų lygmenyje (L4) atliekama analizė

Atlikus analizę komponentų grupių lygmenyje, yra nustatomas kiekvienos grupės efektyvumo kitimas ir TSE rodiklis. Pasinaudojus išplėstinės termodinaminės analizės rezultatais, identifikuojami kritiniai komponentai, neigiamai veikiantys TSE rodiklį – dėl savo prasto efektyvumo ir neigiamo poveikio kitiems to paties posistemio komponentams ar jų grupėms. Siekiant klasifikuoti termodinaminių negrįžtamųjų kilmę ir nustatyti galimus pakeitimus, atliekama analizė komponentų lygmenyje.

Dėl darbo apimčių apribojimų pateikiami komponentų, kuriems buvo sudaryti termodinaminės analizės taikymo metodai, momentinio efektyvumo išraiškoms (esant kintančioms apsupties sąlygoms) gauti. Nagrinėti komponentai iš didžiausių poveikį sistemos TSE rodikliui turinčios patalpų vėsinimo posistemio pozicijai svarstytų alternatyvų. TRNSYS posistemių modeliuose pažymėti komponentai, detaliau nagrinėti šiame poskyryje, matomi 3.21 paveiksle.

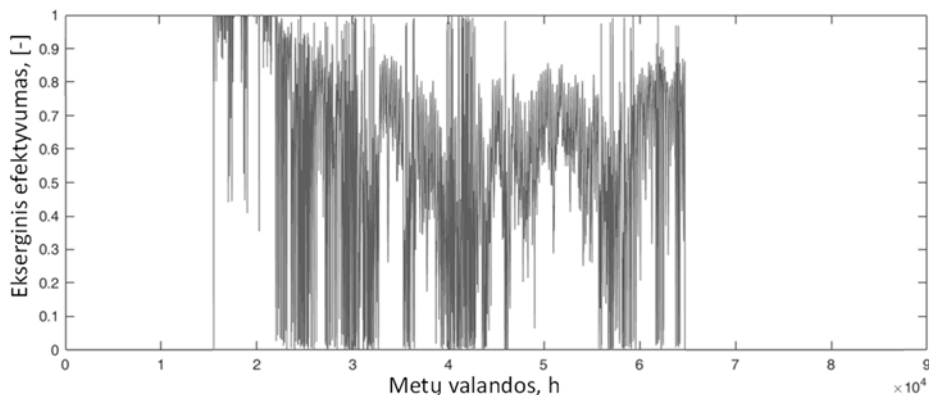


3.21 pav. Nagrinėjami elementai, pažymėti vėsinimo posistemio modelio schemoje
Fig. 3.21. The variation of borehole heat exchangers thermodynamic efficiency

Analizei naudojami imitacinio modeliavimo rezultatai sugeneruoti atliekant TRNSYS simuliacijas. Gauti rezultatai apdorojami *Matlab* programinėje aplinkoje sudarytu kodu.

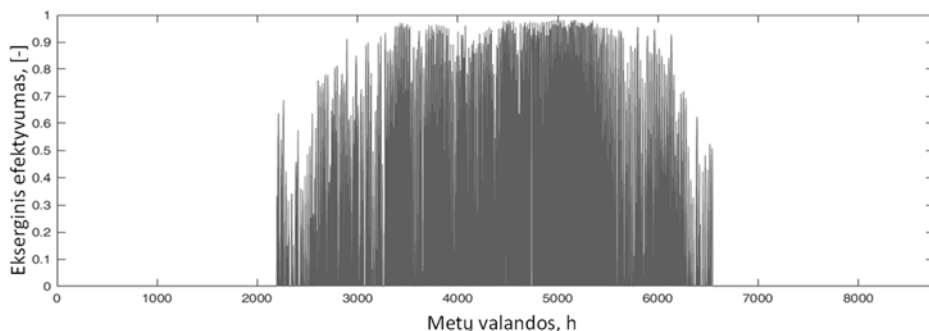
Individualios komponentų efektyvumo išraiškos gali esmingai skirtis nuo sistemos ar posistemio efektyvumo išraiškos dėl efektų, iškreipiančių standartine forma išreiškiamus termodinaminius rodiklius. Tai pasireiškia dėl sąveikos su apsupties sąlygomis ir šiluminės talpos reiškiniais. Komponentų, kuriems reikalingos individualios efektyvumo išraiškos, pateiktos 2.1 poskyryje.

Gruntinio kolektoriaus termodinaminis efektyvumas yra aukštas dėl minimalaus geologinės storymės ir šilumnešio temperatūrų skirtumų. Termodinamino efektyvumo kitimas vėsinimo režime, kai gręžskylės išnaudojamos pasyviu režimu, pateiktas 3.22 paveiksle.



3.22 pav. Gruntinio kolektoriaus termodinaminio efektyvumo kitimas
Fig. 3.22. The variation of borehole heat exchangers thermodynamic efficiency

Tarpinio šilumokaičio (matomo 3.21 paveiksle), naudojamo hidrauliškai atskirti skirtingus šilumnešius turintiems kontūrams, efektyvumas kinta nežymiai ir išlieka aukštas visą funkcionavimo laikotarpį. 3.23 pav. pateikiamas ekserginio efektyvumo kitimas per metus.

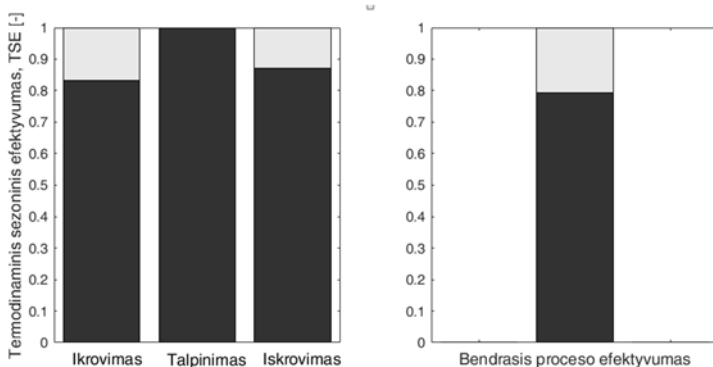


3.23 pav. Šilumokaičio termodinaminio efektyvumo kitimas
Fig. 3.23. The variation of heat exchangers thermodynamic efficiency

Svarbu atkreipti dėmesį, kad ekserginis efektyvumas gali tapti lygus 0 dėl apsupties sąlygų ir šilumnešio temperatūrų kombinacijos arba komponentui nefunkcionuojant.

Pateiktame 3.23 pav. galima matyti, kad skirtingi efektyvumo rodikliai turi gana aukštas vertes. Kai sistema funkcionuoja vienu iš režimų, kitų režimų efektyvumai nėra skaičiuojami ir yra prilyginami 0. Atskirų laiko periodų ekserginių srautų kitimas leidžia apskaičiuoti momentinius efektyvumus, kurie kitame etape yra agreguojami į sezoninio efektyvumo išraiškas nagrinėjamam periodui.

Dėl skirtingų funkcionavimo režimų, akumuliacinės talpos sezoninis efektyvumas gali būti suskaidytas į atskiras dedamąsias, reprezentuojančias įkrovimo, iškrovimo ir talpinimo periodus. Siekiant identifikuoti srautų maišymosi ir destratifikacijos efektus, 3.24 paveiksle pateikiami simuliacijos rezultatai su idealia talpos izoliacija.



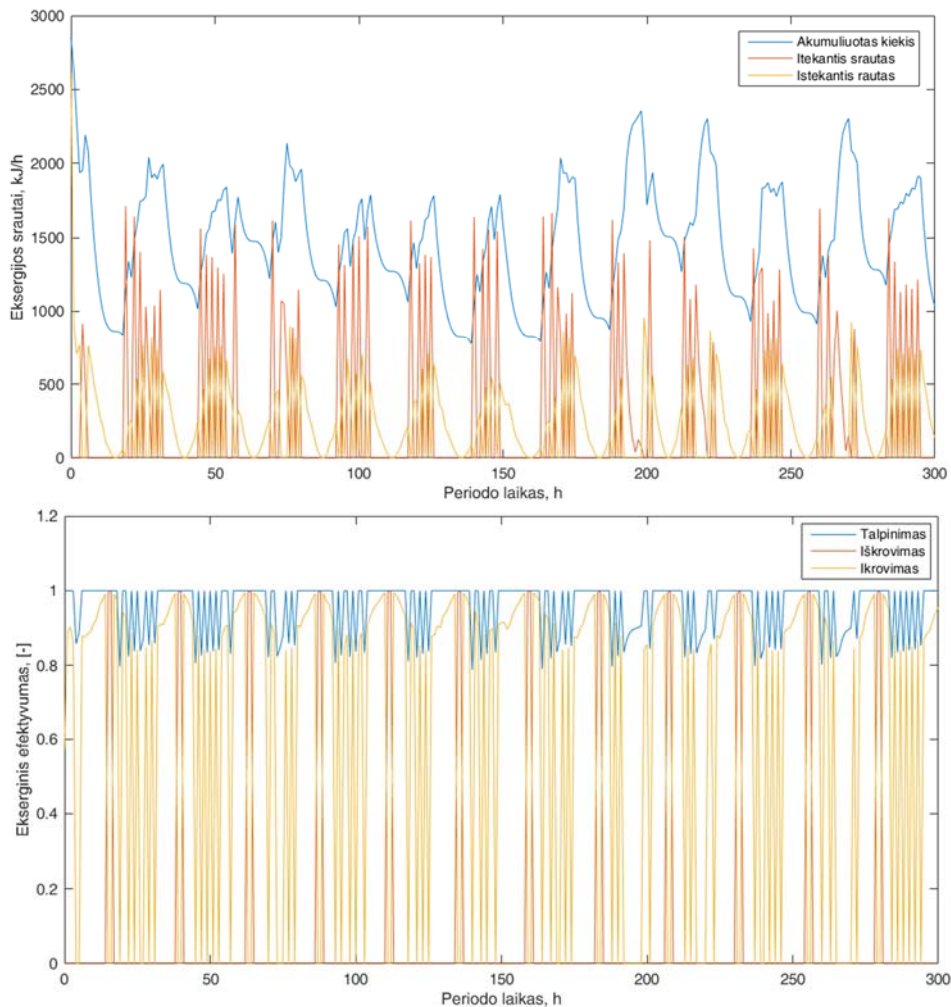
3.24 pav. Skirtingų akumuliacinės talpos funkcionavimo režimų efektyvumai (kairėje) ir bendrasis akumuliacinės talpos efektyvumo rodiklis (dešinėje)

Fig. 3.24. The efficiency of diferent regimes of accumulation tank (left) and overall thermodynamic efficiency of accumulation tank (right)

Akumuliacinės talpos komponento termodinaminis efektyvumas išreiškiamas pasitelkiant eksergijos srautus ir metodiką, pateikiamą 2.2 poskyryje. Momentinis talpos efektyvumas išreiškiamas pagal efektyvumo formuluotę, pasirinktą priklausomai nuo funkcionavimo režimo. Siekiant parodyti akumuliacinės talpos ekserginių srautų kitimą, atvaizduojamos pirmosios 300 simuliacijos valandų, 3.25 paveiksle matomi eksergijos srautai ir akumuliacinės talpos funkcionavimo režimų efektyvumai.

Akumuliacinės talpos efektyvumas dėl šių režimų kompleksiskumo negali būti supaprastintai išreikštas, kaip tai galima padaryti su kitais komponentais. Kaip rodo atskirų funkcionavimo režimų svoriniai rodikliai, didžiausią neigiamą poveikį turi talpos įkrovimas ir iškrovimas. Dėl proceso kompleksiskumo supaprastinti 0D ir 1D modeliai negali suteikti pakankamai informacijos, reikalingos korekcijoms atlikti ar pasirinkti kitą talpos įkrovimo ir iškrovimo

konceptiją. Dėl šios priežasties akumuliacinės talpos komponento alternatyvos yra nagrinėjamos detaliau, pasinaudojant skaičiuojamosios fluidų dinamikos metodais.

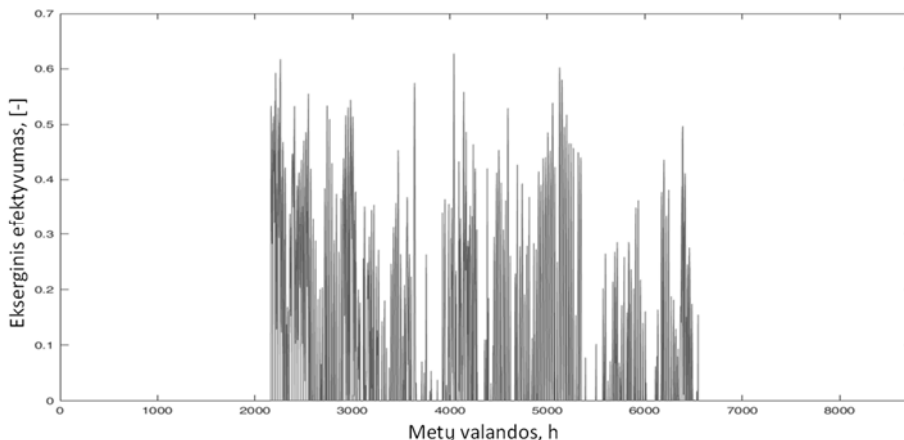


3.25 pav. Akumuliacinės talpos eksergijos srautai (viršuje) termodinaminio efektyvumo kitimas (apačioje)

Fig. 3.25. Exergy flows of accumulation tank (upper) and variation of thermodynamic efficeincy (lower)

Patalpas vėsinančio terminalo (paviršinio vėsinimo komponentai integruoti pastato paviršiuose) efektyvumas iš esmės priklauso nuo patalpos ir šilumnešio

temperatūrų skirtumo, kurį nulemia terminalo šilumos mainų plotas ir komforto užtikrinimui reikalingas šilumos srautas.



3.26 pav. Patalpą vėsinančio terminalo termodinaminio efektyvumo kitimas
Fig. 3.36. The variation of space cooling terminal thermodynamic efficiency

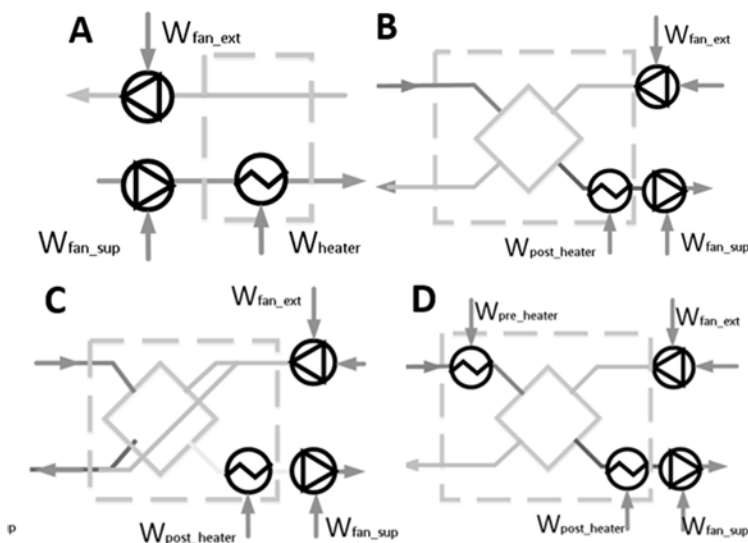
Šių komponentų TSE rodiklis gali būti išreikštas analogiškai taikant sezoninio efektyvumo išraišką kontroliniam tūriui. Komponentų efektyvumas gali būti integruojamas į posistemio efektyvumą pasitelkiant procedūras, kurios yra aprašomos 2.3 poskyryje, tokiu būdu išreiškiant komponentų grupių efektyvumą, kuris integruojamas į posistemio efektyvumo išraišką.

3.2.5. Pagal sąlygų atsikartojimo dažnį apskaičiuojamo termodinaminio sezoninio efektyvumo atvejis

Pristatoma metodika gali būti adaptuojama ir sistemoms, kuriose sąveikauja dujinės fazės fluidai. Pateikiamas vėdinimo įrenginio šilumogrąžos funkciją atliekančio šilumokaicio analizės atvejis. Vėdinimo įrenginys, atliekantis tiekiamo oro pašildymo funkciją, tiekiamo oro temperatūrą gali užtikrinti 4 skirtingais būdais. Dėl šalinamo oro drėgmės, šilumokaityje formuojasi šerkšnas, todėl reikalinga papildoma energija norint atitirpinti. Principinės schemos pateikiamos paveiksle (3.25 pav.).

Schemoje matoma A sistema tiekiamą orą pašildo elektriniu šildytuvu, B – naudojama ideali šilumogrąža (be užšalimo reiškinių) ir likęs energijos kiekis padengiamas elektriniu šildytuvu. Kadangi realiose šilumogrąžos įrenginiuose užšalimo reiškiniai yra neišvengiami, reikalingi techniniai sprendimai šio reiškinio prevencijai. Sistemoje C užšalimo išvengiama naudojant apvedimo

sklendę (angl. *by-pass*), D sistemoje – pirminis pašildymas prieš šilumogrąžą (angl. *pre-heater*).

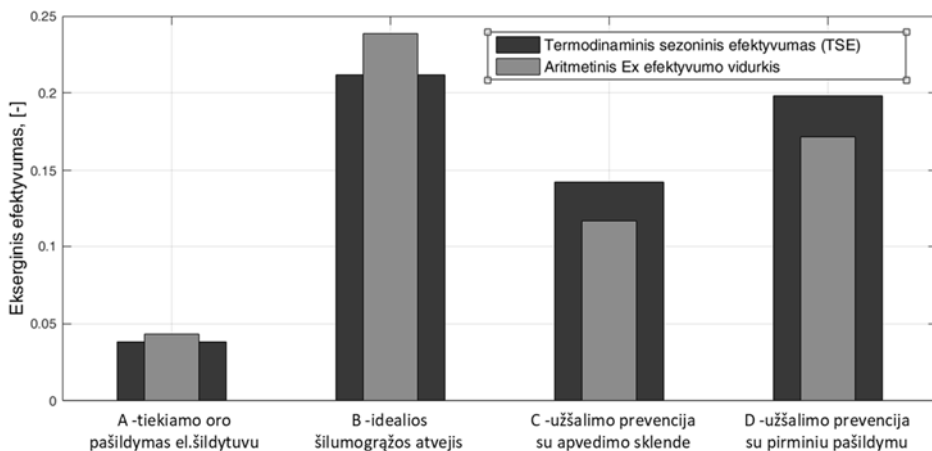


3.27 pav. Tiekiamo oro pašildymo funkciją atliekančių komponentų integracijos schemas (A–D)

Fig. 3.27. The schemes of component integration to perform ventilation supply air pre-heating function (A–D)

Šių skirtingų, tiekiamo oro pašildymo funkciją atliekančių, techninių kombinacijų efektyvumas gali būti vertinamas pagal dinaminio modeliavimo rezultatus (taikant 2.3 poskyryje aprašytą metodiką). Kadangi šilumogrąžos procesas turi priklausomybę nuo kraštinių sąlygų, kurios gali būti apibūdinamos statistiniu pasikartojimu – TSE išraiškoje pagal 2.21–2.23 formules, nariui g_i priskiriant kraštinių sąlygų trukmę. Apskaičiuotas dydis yra palyginamas su vertinimo periodo ekserginių efektyvumų aritmetiniu vidurkiu (3.28 pav.).

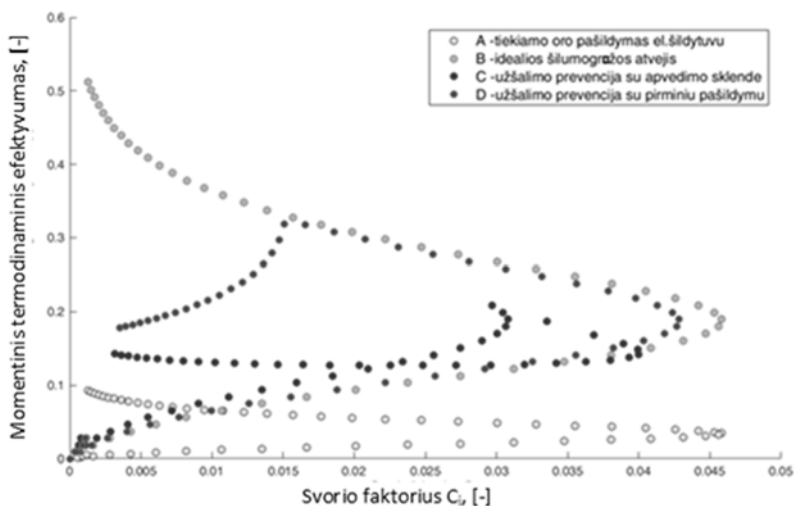
Svarbu atkreipti dėmesį, kad vidutinis sezoninis efektyvumas (aritmetinis vidurkis) ir TSE rodiklis nesutampa. Šių skirtumas priklauso nuo integracijos atvejo. A ir B atvejais vidutinis efektyvumas yra didesnis, o C ir D – mažesnis už TSE rodiklį. Tai rodo, kad nėra korektiška sezoniniam efektyvumui apibūdinti naudoti aritmetiniu vidurkiu pagrįstas išraiškas. Išrikiavus skaičiuojamuosius žingsnius pagal efektyvumą ir svorio faktorių, galima palyginti skirtingus integracijos scenarijus (3.27 pav.).



3.28 pav. Termoodinaminio sezoninio efektyvumo ir vidutinio termoodinaminio efektyvumo palyginimas

Fig. 3.28. Comparison between thermodynamic seasonal efficiency and average thermodynamic efficiency

Pateiktame grafike (3.29 pav.) matyti, kad A sistemos maksimalus efektyvumas siekia 0,092; minimalus – 0,00. Didžiausią svorį turinčiomis sąlygomis efektyvumas yra 0,034. Analogiškai kitoms sistemoms: B – 0,51; 0,00; 0,19, C – 0,21; 0,00; 0,14, D atveju – 0,32, 0,00, 0,19.



3.29 pav. Svorio faktoriaus ir ekserginio efektyvumo pasiskirstymas skirtingais atvejais

Fig. 3.29. Distribution of weight factor and exergy efficiency in different cases

Turint šią informaciją, galima tarpusavyje lyginti techninius sprendimus, įvertinti efektyvumo ekstremumus ir sąlygas, kurioms esant tikslingiausia analizuoti sistemą ieškant gerinimo ir optimizavimo galimybių.

Remiantis šiuo pavyzdžiu, galima teigti, kad termodinaminio sezoninio efektyvumo išraiška gali būti panaudojama ne tik dinaminio modeliavimo rezultatams apdoroti. Metodu gali būti generuojami statistinių pasikartojimų trukme (angl. *Bin method*) pagrįstų skaičiavimų rezultatai.

3.2.6. Komponentų realus tobulinimo potencialas

Realaus tobulinimo potencialas išreiškia galimą komponento efektyvumo prieaugį, jei šis funkcionuotų sąlygomis, kai sukuriamas entropijos generavimo minimumas. Šis dydis išreiškiamas pasitelkiant entropijos generavimo teoriją, optimizavimo metodus entropijos minimumo paieškai. Tam, kad šis ribinis entropijos dydis būtų identifiktuotas, reikia entropijos generavimo išraišką formuoti kaip sudėtinę, susietuosius šilumos mainų ir skysčių mechanikos procesus įvertinančią išraišką.

Procesuose, kuriuose slėgio nuostoliai neapriboja šilumos mainų intensyvumo ir lemiamą poveikį turi maišymosi ir šilumos laidumo procesai, entropijos generavimo minimumas gali neegzistuoti su parametru rinkiniu, kuris užtikrina komponento funkcionalumą. Akumuliacinės talpos komponente vyksta kompleksiški procesai, kurių supaprastintais matematiniais modeliais nėra galimybės išreikšti ir suformuoti entropijos generavimo minimumo išraiškos. Todėl akumuliacinės talpos realus tobulinimo potencialas išreiškiamas pagal procesą, kuriame vyksta ideali stratifikacija ir įtekantis šilumnešis tiesiogiai patenka į sluoksnius, kurių temperatūra yra tapati srauto temperatūrai.

Pasinaudojant P1 prioriteto faktoriumi, atrenkami kritiniai komponentų periodai, kuriuose tikslinga nagrinėti realaus tobulinimo potencialo rodiklius. Pagal metodiką, aprašytą 2.4 skirsnyje, apskaičiuojamas realaus tobulinimo rodiklis ir išreiškiami prioriteto faktoriai. Analizei pasirinkti komponentai, reprezentuojantys tipinius elementus, naudojamus termohidrodinaminių kontūrų sistemose. Realus tobulinimo potencialas ir prioriteto faktoriai pateikiami 3.5 lentelėje.

Svarbu atkreipti dėmesį, kad komponento analizė didesniu detalumu yra tikslinga tais atvejais, kai žemesnio detalumo analizė negali atskleisti informacijos, reikalingos šio tobulinimui. Šis sprendimas priimamas remiantis prioriteto faktoriumi P4 ir turima informacija apie termodinaminių negrįžtamųjų kilme, bei galimus sprendimus efektyvumui didinti.

3.5 lentelė. Komponentų realus tobulinimo ir prioriteto faktorius**Table 3.5.** Real improvement potential and priority factors of components

Komponentas	η_i	IP_{real}	P4
Saulės kolektoriai	0,17	0,02	0,67
Vėsinimo terminalas	0,22	0,17	1
Vertikalus gruntinis šilumos kolektorius	0,38	0,04	0
Akumuliacinė talpa	0,63	0,2	0,67
Adsorbcinė šalčio mašina	0,12	0,075	0,32

Šiuo atveju vėsinimo terminalas yra didžiausio tobulinimo potencialo, kuris gali būti realizuotas mažinant dėl temperatūrų skirtumo atsirandančius negrįžtamumus – didinant šilumos mainų plotą ir mažinant temperatūrų skirtumą tarp vidutinės šilumnešio ir patalpos temperatūrų. Šios priemonės gali būti formuojamos atlikus entropijos generavimo minimumo išraiškos jautrumo analizę. Tokiu atveju papildomas didesnio detalumo imitacinio modelio naudojimas neatneša papildomos informacijos, nes entropijos generavimas yra tolygiai pasiskirstęs komponento geometrijoje.

Akumuliacinės talpos atveju 1D modelis, naudojamas TRNSYS programoje, neatskleidžia šilumnešio maišymosi priežasčių, todėl siekiant suprasti kilmę ir poveikį darančius veiksnius, yra reikalinga didesnio detalumo analizė.

3.2.7. Vidinės konfigūracijos lygmenyje (L5) atliekama analizė

Ankstesniuose detalumo lygiuose atliekami analizės veiksmai identifikuoja komponentus, kuriems reikalinga detalesnė analizė, galinti būti atliekama pasitelkiant skaičiuojamosios fluidų dinamikos metodus. Gaunamas sprendinių laukas yra apdorojamas lokalaus entropijos generavimo metodu, kuriuo identifikuojamas termodinaminių negrįžtamumų atsiradimo intensyvumas konkrečiuose komponento geometrijos vietose.

Akumuliacinės talpos funkcija sistemoje yra kompensuoti poreikio ir gamybos galimybių nesutapimą arba sumažinti pikines apkrovas, tenkančias šilumos arba vėsos šaltiniui.

Termodinaminis talpos efektyvumas lemia, kokios temperatūros šilumnešis gali būti išgaunamas iš akumuliacinės talpos. Ši priklausomybė gali būti formuluojama atvirkštiniu būdu, kai pagal šaltinio, kraunančio akumuliacinę talpą

šilumnešio temperatūra nustatoma pagal poreikiui reikalingą tikslinę temperatūrą ir talpos efektyvumą.

Kaip rodo entropijos generavimo analizė – talpos efektyvumui tiesioginį poveikį daro įkrovimo ir iškrovimo procesai. Šių periodų metu sukuriamas didžiausias termodinaminių negrįžtamumų kiekis dėl energijos kokybės degradavimo. Komponento lygmenyje atliekamos analizės rezultatas leidžia nustatyti šiuos reiškinius ir klasifikuoti poveikį komponento, posisteminio ir visos sistemos efektyvumui. Tačiau komponento lygmenyje atliekamos analizės generuojamos informacijos nepakanka identifikuoti termodinaminių negrįžtamumų lokacijos komponento geometrijoje ir pirminių kintamųjų kitimo specifikos. Dėl šios priežasties akumuliacinės talpos turis turi būti analizuojamas didesniu detalumu.

Globaliais analizės metodais identifikavus kritinius sistemos funkcionavimo periodus, detalesnei proceso analizei pasitelkiamas lokalinės analizės metodas. Analizuojami dydžiai (šilumnešio temperatūriniai gradientai ir greičių lauko vektorių projekcijos) gaunami kaip atlikto nestacionaraus proceso – natūralios konvekcijos ir laminarinės tėkmės proceso rezultatas. Sudarytas 2D aši–simetrinis skaičiuojamasis modelis (3.30 pav.), kurio esminės kraštinės sąlygos ir prielaidos:

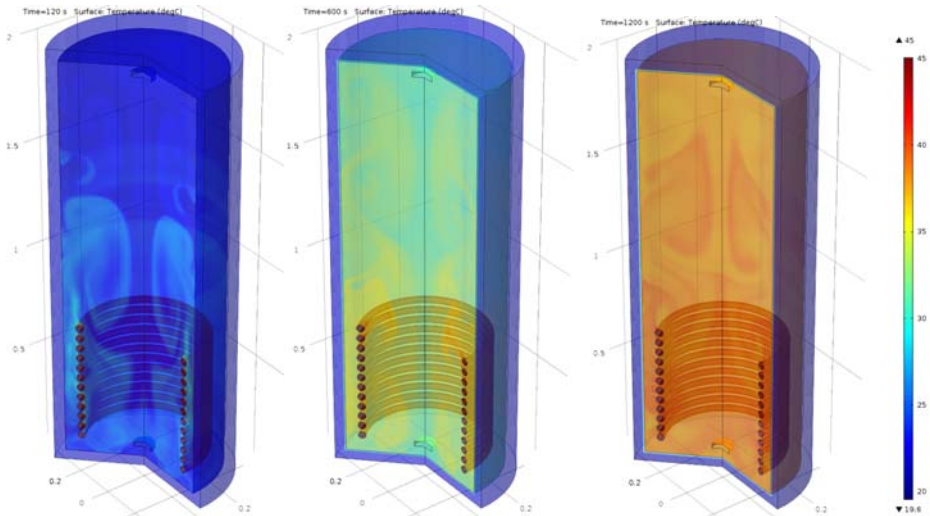
- greitis ant sienelės paviršiaus $u = 0$ m/s;
- skysčio (vandens) charakteristikos yra priklausomos nuo temperatūros.

Remiantis anksčiau atliktais stratifikuotų talpų tyrimais ir modeliavimo studijomis, 2D aši–simetrinis sprendimo modelis yra pakankamo tikslumo ir reikalauja žymiai mažesnių skaičiuojamųjų sąnaudų kiekio lyginant su 3D modeliu (Streckienė 2011).

Gaunamas temperatūrinio lauko ir greičių kitimas gaunamas ir toliau apdorojamas pasitelkiant matematines išraiškas, pateiktas metodikos dalyje. Išreiškiamas pagamintos entropijos kiekis dėl temperatūrinio gradiento (laidumo reiškiniai), fluido greičio vektorių projekcijų (natūralios konvekcijos sukeltas skysčio judėjimas), suminis pagamintos entropijos skaičius ir Bejan skaičius, išreiškiantis santykį tarp fluido tėkmės ir šilumos laidumo reiškinių.

Akumuliacinėje talpoje susidarantys karštas ir šaltas vanduo išsisluoksniuoja į du sluoksnius, tarp kurių atsiranda temperatūrinis „laiptas“ ir susiformuoja pereinamosios temperatūros sluoksniu (angl. *thermocline*), kuriame vyksta didžiausi temperatūros pokyčiai. Tyrimais nustatyta, kad šiluminė stratifikacija gali pagerinti visos šilumos akumuliacijos sistemos veikimą, palyginus su sistema, kurioje akumuliacinio fluido sumaišymas (Jaluria, Streckienė 2011, cituoja Gupta, 1982; Zachár et al. 2003, Altuntop et al. 2006, Andersen et al. 2008). Temperatūrinės stratifikacijos suardymas yra neigiamas reiškinys, kurio eliminavimas arba sušvelninimas yra būtina sąlyga siekiant efektyvaus energijos akumuliacinio atsinaujinančių energijos išteklių sistemose. Tolesniuose poskyriuose aprašomas akumuliacinės talpos įkrovimo procesas esant pradiniam

temperatūriniam gradientui ir situacija, kai visas talpos tūris yra pastovios temperatūros.



3.30 pav. Akumuliacinės talpos modelis COMSOL programoje
(temperatūrinio lauko kitimas per laiką)

Fig. 3.30. Accumulation tank model in COMSOL software
(evolution of temperature field during the time)

Baigtinius elementus naudojančiame *Comsol Multiphysics* programiniame pakete sudarytas 2D aši-simetrinis modelis akumuliacinės talpos įkrovimo ir iškrovimo procesų termodinaminiam efektyvumui nagrinėti pasitelkiant lokalų entropijos generavimo analizės metodą. Skaičiuojamieji parametrai – temperatūra (T), slėgis (p) ir greičio vektorių laukas (u , v , w). Šie rodikliai bus toliau naudojami entropijos generavimo parametrams išreikšti.

Skaičiuojamasis fluidų dinamikos modelis sudaromas laminarios tėkmės, natūralios konvekcijos procesams nagrinėti. Programinis paketas tiesiogiai sprendžia Navje-Stokso lygtis, kurios *Comsol* programoje suformuluotos tokia matematine išraiška:

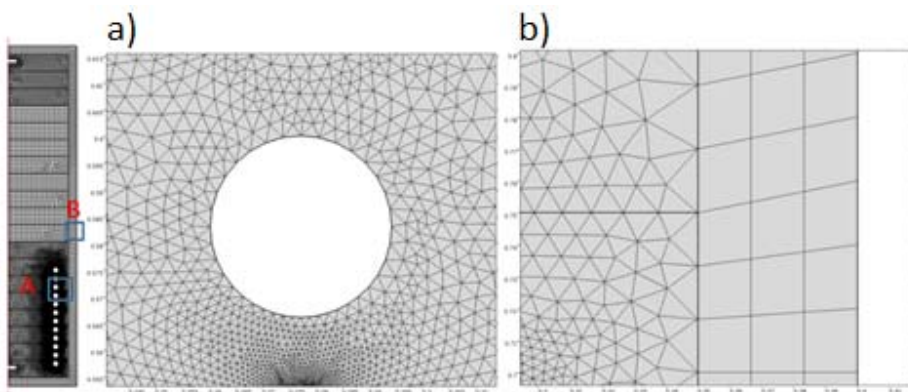
$$\rho \frac{du}{dt} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I \right]; \quad (3.1)$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho u) = 0. \quad (3.2)$$

Skysčio ir kietos sienelės sandūroje taikoma kraštinė sąlyga $u = 0$.

Skysčio parametrai traktuojami kaip priklausomi nuo terpės temperatūros ir apskaičiuojami iteraciniu būdu pagal susidariusį temperatūrinį lauką.

Suformuotas skaičiuojamųjų elementų tinklas (3.31 paveikslas) sutankinant elementų kiekį ties intensyvaus maišymosi zonomis. Akumuliacinės talpos izoliacijos sluoksnyje vykstantis šilumos plitimas laidumu yra įvertinamas minimaliu tikslumu ir vertinamas kaip kintantis per laiką kintančio proceso eigoje.



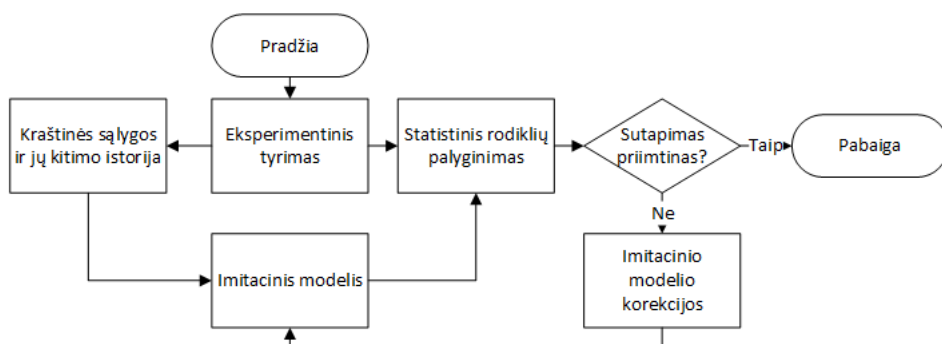
3.31 pav. Skaičiuojamųjų elementų tinklas: a) skaičiuojamasis tinklas aplink šilumokaičio vamzdelį; b) tinklas prie talpos sienelės

Fig. 3.31. Numerical calculation mesh: a) fragment of mesh around heat exchanger pipe; b) mesh in the fluid-solid boundary

Izoliacinio sluoksnio skaičiuojamųjų elementų tinklas suformuojamas su minimaliu reikalingų elementų skaičiumi siekiant padidinti skaičiavimo procedūros našumą. Daroma prielaida, kad toks veiksmas yra adekvatus, nes šilumos srautas per apšildintos talpos sienelę (esant 50 mm, 0,035 W/mK izoliacinės medžiagos sluoksniui) daro minimalią įtaką galutiniam rezultatui. Modeliuojamas akumuliacinės talpos tūris yra 500 litrų. Pagrindiniai matmenys – aukštis 1800 mm, skersmuo 600 mm.

Skaičiavimas atliekamas $1e^{-3}$ santykinio tikslumu ir $2,5e^{-5}$ absoliutine tolerancija. Skysčio tėkmės procesas ir sienelėje vykstantis šilumos laidumas sprendžiamas tiesiogiai kaip susietasis procesas.

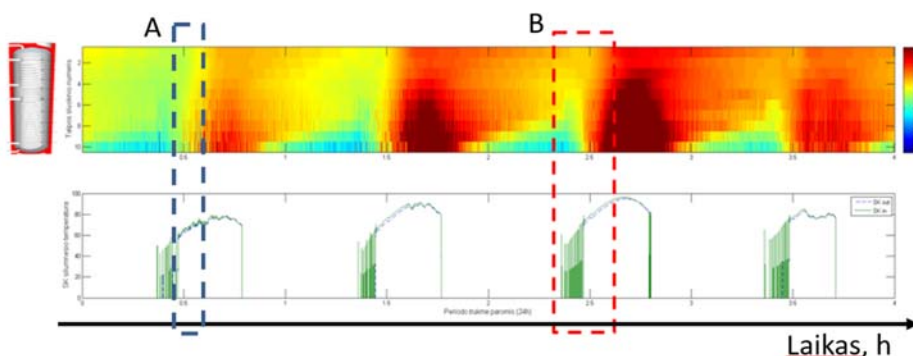
Siekiant užtikrinti imitacinio modelio pateikiamų prognozių absoliutinio rezultato korektiškumą ir minimalią vidinę modelio neapibrėžtį, buvo atliktas naudojamų CFD ir TRNSYS elementų kalibravimas pagal eksperimentinio tyrimo rezultatus. Siekiant efektyvios modelių kalibravimo procedūros (3.32 pav.), tipinių procesų, vykstančių sistemoje, eksperimentinio tyrimo rezultatai buvo lyginami su modelių generuojamais rezultatais esant vienodoms kraštinėms sąlygoms.



3.32 pav. Principinė kalibravimo procedūros schema
Fig. 3.32. The scheme of principal calibration procedure

Sistemos, kuriose yra charakteringas generavimo galimybių ir poreikių prasilenkimas, akumuliacinės talpos turi didelę įtaką sistemos efektyvumui, todėl kalibravimo proceso iliustravimui pasirinkta akumuliacinė talpa. Eksperimentinis tyrimas atliktas pasinaudojant Vilniaus Gedimino Technikos universiteto Pastato Energetinių ir Mikroklimato Sistemų (PEMS) laboratorijoje esančia akumuliacinė talpa, aptarnaujančia saulės kolektorių sistemą. Funkcinė šio įrenginio paskirtis – transformuotos atsinaujinančios energijos kaupimas arba energijos transformavimo galimybių ir poreikių harmonizavimas laiko atžvilgiu. Matuojami parametrai pateikiami 3.6 lentelėje.

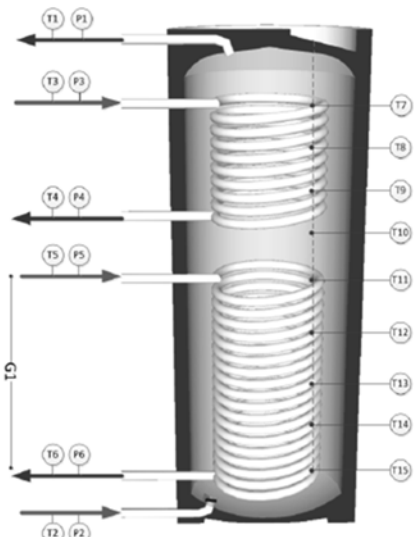
Matavimo rezultato duomenys apdorojami Matlab programiniu paketu. Temperatūrinis pasiskirstymas akumuliacinės talpos tūryje ir energijos srantai, įtekantys į akumuliacinę talpą laiko atžvilgiu atvaizduoti 3.33 pav.



3.33pav. Akumuliacinės talpos eksperimentinio tyrimo
 rezultatų apibendrinimas

Fig. 3.33. The graphical summary of accumulation tank experimental research

3.6 lentelė. Eksperimentinio matavimo prietaisų schema**Table 3.6.** The setup of experimental measurement devices

	<p>1–2 srautai sukuriantys masės mainus įkraunant ir iškraunant talpą tūriu</p> <p>3–4 viršutinio integruoto spiralinio šilumokaičio srautai, kuriais akumuliacinės talpos šilumnešis netiesiogiai aušinamas arba šildomas</p> <p>5–6 apatinio integruoto spiralinio šilumokaičio srautai, kuriais akumuliacinės talpos šilumnešis netiesiogiai aušinamas arba šildomas</p> <p>7–15 akumuliacinės talpos temperatūrinis gradientas talpos aukščio atžvilgiu. Išmatuota talpos tūryje įleidžiamu zondų.</p>
---	--

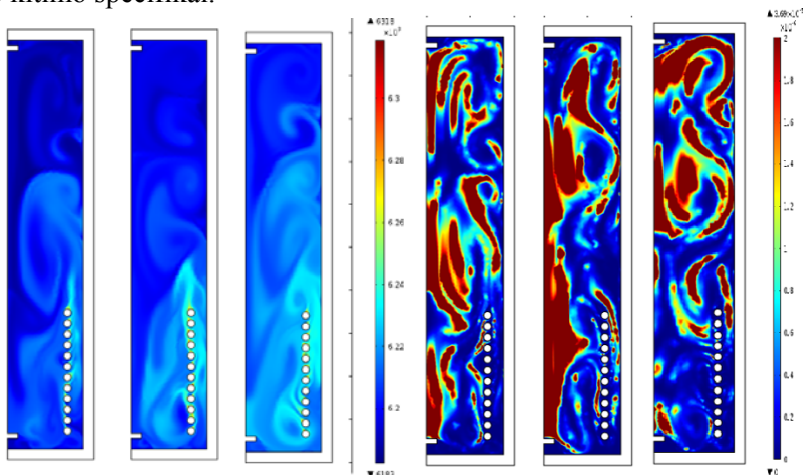
Paveiksle (3.33 pav.) matomas apibrėžtas duomenų regionas pasirinktas modeliavimo rezultatų validavimui. Paveiksle pažymėtas A regionas reprezentuoja tuščios akumuliacinės krovimą, B regionas – talpos, turinčios pradinę stratifikaciją įkrovimą.

Skaitinio modeliavimo rezultatai lyginami su charakteringu periodu ir modelio skaičiuojamieji parametrais matavimo taškuose ir modelio kokybė įvertinama atsižvelgiant į absoliutinį skirtumą tarp matavimo ir SFD modelio gauto rezultato.

3.2.8. Neįkrautos akumuliacinės talpos įkrovimas (A sąlygos)

Akumuliacinė talpa, kurios viso tūrio pradinė temperatūra 20 °C įkraunama integruotu spiraliniu šilumokaičiu, kurio paviršiaus vidutinė temperatūra yra 40 °C. Kaip rodo supaprastintas vienmatis (1D) modeliavimas TRNSYS programoje, šio proceso pradžioje susidaro žymus termodinaminis negrįžtamumas, kuris turi lemiamą įtaką komponento efektyvumui eksploatacinėmis sąlygomis. Atliekant modeliavimą, siekiama įvardyti konkrečią komponento dalį, kurioje sukuriama termodinaminiai negrįžtamumai. Kadangi entropijos generavimo dedamųjų kontekste (pagal Be skaičių) dominuoja dėl temperatūros gradiento susidarantys termodinaminiai negrįžtamumai, SFD modeliavimo

rezultatuose (3.34 pav.) didžiausias dėmesys turi būti teikiamas šio (SgenC) dydžio kitimo specifikai.



3.34 pav. Per laiką kintančio proceso metu susidarantis SgenD (3 fragmentai kairėje) ir SgenC (3 fragmentai dešinėje) dydžiai atvaizduoti akumuliacinės talpos pjūvyje

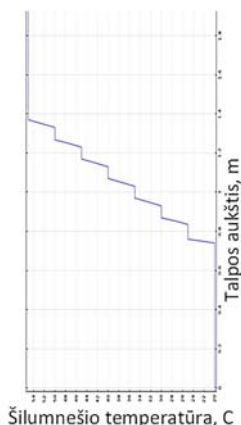
Fig. 3.34. The variation of SgenD (3 pictures in the left) and SgenC (3 pictures in the right) in time variable process at acumulation tank

Duomenys apdorojami pritaikant 2.6 poskyryje aprašytą lokalaus entropijos generavimo metodą. Ši situacija yra paranki atlikti SFD modeliavimą, nes akumuliacinės talpos tūryje (ją įkraunant integruotu šilumokačiu) vykstantys tėkmės procesai gali būti charakterizuojami kaip laminariniai. Esant šiam tėkmės režimui, skaičiuojamieji metodai leidžia greitai ir pakankamai tiksliai nustatyti pirminius kintamuosius modeliuojamo elemento tūryje. Dėl srauto tėkmės atsirandantis entropijos generavimas pastebimas visame akumuliacinės talpos tūryje (3.34 pav.), dėl natūraliai konvekcijai būdingų kylančių ir besileidžiančių srautų.

Gautas rezultatas ne tik grafiškai iliustruoja neigiamą maišymosi poveikį, bet ir suteikia informaciją apie konkrečią entropijos susidarymo lokaciją. Turint šią informaciją, analitikui sudaroma galimybė objektyviai palyginti galimas alternatyvias konstrukcijas ar konfigūracijas. Atsižvelgiant į reiškinius, identifikuojamus šiomis (A sąlygos) ir kitais analizuojamais atvejais (B sąlygos) gali būti priimamas sprendimas dėl sprendimų keitimo, kuris padėtų sukurti sistemą, turinčią geresnį bendrą TSE rodiklį (visos sistemos apimtyse).

3.2.9. Talpos su pradiniu temperatūriniu gradientu įkrovimas (B sąlygos)

Tipinėmis funkcionavimo sąlygomis akumuliacinė talpa nėra visiškai iškraunama ir eksploatacijos eigoje yra įkraunama, kai joje jau yra susidaręs temperatūrinis gradientas (3.35 pav.).



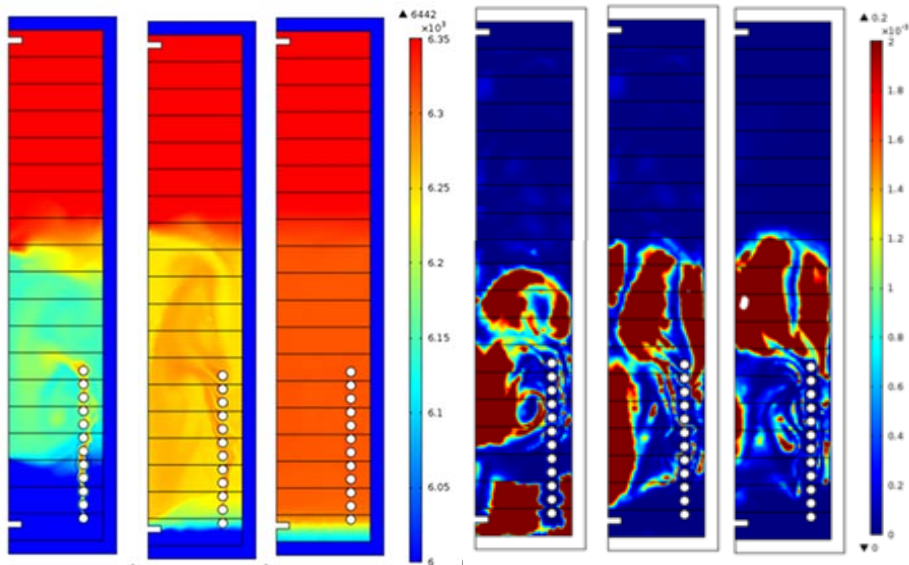
3.35 pav. Pradinis temperatūrinis gradientas akumuliacinėje talpoje
Fig. 3.35. Initial temperature gradient in accumulation tank

Siekiant įvertinti šias sąlygas, atliekamas akumuliacinės talpos įkrovimo proceso modeliavimas atskiriems talpos sluoksniams priskiriant pradines temperatūras, pavaizduotas paveiksle (3.35 pav.). Temperatūros profilis COMSOL aplinkoje sudaromas remiantis eksperimentinio tyrimo metu užfiksuotais rezultatais.

Atlikto modeliavimo rezultatai apdorojami pagal aprašytą matematinę procedūrą. Apskaičiuoti entropijos generavimo rodikliai atvaizduojami skirtingais laiko momentais iliustruojant proceso eigą per laiką. Rezultatai matomi 3.36 paveiksle.

Šiuo atveju taip pat dominuoja entropijos generavimas dėl šilumos mainų proceso (baigtinio temperatūrų skirtumo). Tačiau šiuo atveju matomas intensyvus maišymosi procesas didžiausio temperatūrinio gradiento riba. Šie veiksniai daro poveikį stratifikacijai ir gali būti indikuojami kaip žalingi ir natūralios konvekcijos poveikis entropijos generavimui yra didesnis, nei pirmuoju (A sąlygos) nagrinėtu atveju.

Atlikus analizę, šiame lygmenyje galima identifikuoti, kad akumuliacinės talpos atveju didžiausią poveikį TSE rodikliui turi maišymosi efektai, mažinantys temperatūrinį gradientą (stratifikaciją) arba neleidžiantys šiam reiškiniui susidaryti (destratifikacija).



3.36 pav. Per laiką kintančio proceso metu SgenD (3 fragmentai kairėje) ir SgenC (3 fragmentai dešinėje) susidarymas stratifikuotoje akumuliacinėje talpoje

Fig. 3.36. The distribution of SgenD (3 images in left) and SgenC (3 images in right) in stratified accumulation tank across analysis time frame

Siekiant rasti tinkamą sprendimą, vedantį prie aukštesnio visos sistemos TSE rodiklio, gali būti svarstomi patobulinimai komponento konfigūracijoje arba alternatyvią konfigūraciją turintys įrenginiai, išnaudojantys stratifikatorius, atskiriančius skirtingų šilumnešių kontūrus per didelio šilumos mainų ploto šilumokaičius.

3.3. Metodikos efektyvumo įvertinimas

Siekiant palyginti sudaryto analizės metodo efektyvumą su tradiciniu sprendimo būdu, naudojamas santykinis skaičiuojamųjų ir laiko sąnaudų palyginimas. Lyginimas atliekamas taikant prielaidą, kad gaunamas rezultatas išlieka tapatus visais atvejais. Detalesnis šios procedūros aprašymas pateikiamas 2.7. poskyryje.

Pasinaudojant skaičiuojamųjų sąnaudų kaštų (angl. *Computational effort*) metodo analogija išreiškiamas kumuliacinis skaičiuojamųjų sąnaudų kitimas kintant detalumo lygmeniu. Šis palyginimas nėra objektyvus išreiškiant poreikį absoliutiniais dydžiais, tačiau yra tinkamas tarpusavyje palyginti skaičiuojamąsias sąnaudas naudojant santykinius dydžius. Nesant kitų šiam atvejui tinkamų efektyvumą įvertinančių metodų, pritaikoma ši analogija. Metodikos

rezultatas palyginimas su atveju, kai visa sistema būtų analizuojama visuose detalumo lygmenyse vienodai.

3.7 lentelė. Parametrų, skaičiuojamųjų ir laiko sąnaudų apskaičiavimui, santrauka
Table 3.7. The summary of parameters used for relative computational cost and time effort expression

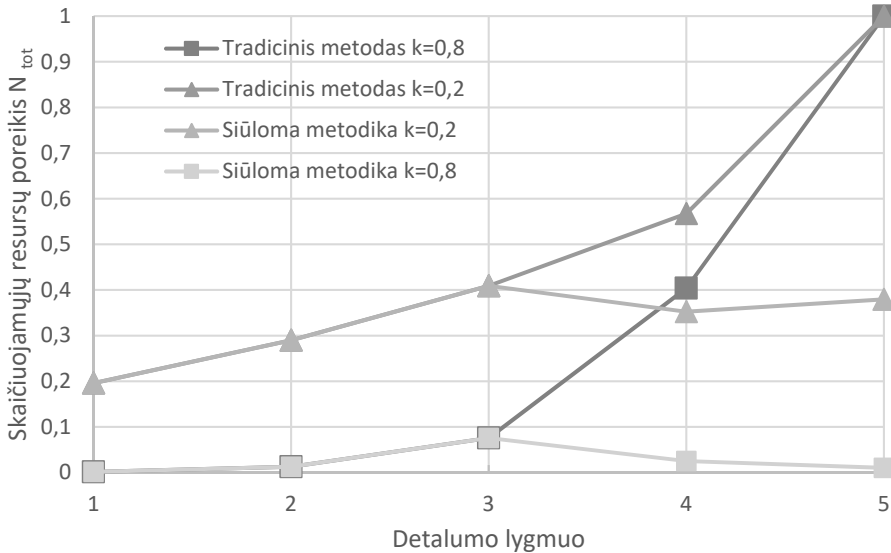
Detalumo lygis	Komponentų skaičius	Detalumo laipsnis	Laisvės laipsnių skaičius	Laiko žingsnių skaičius	Sprendinių skaičius
Tradicinė skaičiavimo eiga					
L1	1	1	1	8760	8760
L2	4	2	4	8760	35040
L3	16	3	16	8760	140 160
L4	64	4	64	8760	560640
L5	64	5	448000	8760	$3,924 \cdot 10^9$
Disertacijoje siūloma skaičiavimo eiga					
L1	1	1	1	8760	8760
L2	4	2	4	8760	35 040
L3	16	3	16	8760	140 160
L4	4	4	36	8760	315 360
L5	1	5	32 000	720	5 040 000
MAX	64	5	448 000	8760	$3,924 \cdot 10^9$

Sąnaudos išreiškiamos pagal parametrų kiekį, lemiantį kompleksiškumą, laiko ir skaičiuojamųjų sąnaudų kiekį modeliui sudaryti, simuliacijai ir rezultatams apdoroti. Parametrų, naudojamų skaičiuojamųjų ir laiko sąnaudų apskaičiavimui santrauka pateikiama 3.7 lentelėje. Šie parametrai yra pagrįsti 3 disertacijos skyriuje pateikto atvejo duomenimis

Apdorojus šiuos parametrus, yra išreiškiamas santykinis sąnaudų poreikis. Palyginamuoju principu galima įvardyti, kuriuose detalumo lygiuose atsiskleidžia pasiūlyto metodikos pranašumai. Kaip galima matyti paveiksle (3.37 pav.) pirmuosiuose trijuose detalumo lygmenyse sąnaudų poreikis sistemos ir posistemių modeliavimui yra tapatus, nes atliekamas modelio sudarymas, simuliacija ir duomenų apdorojimas atliekamas vienodomis apimtimis.

Ketvirtajame lygmenyje yra nagrinėjami kritinio posistemo komponentai, jų termodinaminis efektyvumas ir jo kitimas. Dėl koncentracijos į didžiausią prioritetą turinčio posistemo komponentus, sąnaudų kiekis analizei atlikti sumažėja dėl eliminuoto poreikio detaliai modeliuoti kitus posistemių, kurių

nuodugnesnės analizės rezultatyvumas turi mažą tikimybę dėl mažesnio poveikio sistemos termodinaminiam efektyvumui. Priklausomai nuo pasirinktų k rodiklio verčių, skirtumas gali varijuoti intervale nuo 1,2 iki 2,6 karto.



3.37 pav. Skaičiuojamųjų ir laiko sąnaudų pokytis keičiantis sistemos modelio detalumui

Fig. 3.37. The demand of computational cost and time effort in comparison to detailness level of system model

Penktajame lygmenyje didžiausiu detalumu yra nagrinėjami komponentai, kurie pagal realaus tobulinimo potencialą gali turėti didžiausią efektyvumo prieaugį ir / arba entropijos generavimo kilmę ir priežastys nėra objektyviai atspindimos supaprastintų modelių. Dėl nagrinėjamo atrinkto komponento, identifikuotais kritiniais periodais, žymiai sumažėja skaičiuojamųjų sąnaudų poreikis lyginant su nuoseklia sistemos arba posistemio analize viso sezono trukmei prilyginamu periodu. Priklausomai nuo pasirinktų k rodiklio verčių, skirtumas gali varijuoti intervale nuo 3 iki daugiau kaip 10 kartų.

Būtina pabrėžti, kad skirtumas tarp tradicinio sprendimo būdo ir siūlomos TSE gerinimo metodikos priklauso nuo naudojamų a, b, c svorio koeficientų (kurių suma lygi 1). Atliekant jautrumo analizę, nebuvo rasta kombinacija, kuriai esant siūlomo TSE gerinimo metodikos skaičiuojamųjų sąnaudų vertė viršytų tradiciniame sprendimo būdai reikalingas skaičiuojamąsias sąnaudas.

Pasitelkiant palyginamąjį principą, galima identifikuoti, kad pasiūlytas metodas turi santykinai mažesnes skaičiuojamąsias sąnaudas aukštesniuose

detalumo lygmenyse. Pasiūlyta metodika leidžia produktyviau pasinaudoti analizės metodais sumažinant skaičiuojamąsias sąnaudas sistemos ir jos alternatyvų analizavimui dėl nenagrinėjamų sistemos dedamųjų, kurios turi santykinai mažą poveikį visos sistemos termodinaminiam efektyvumui.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Pagal sudarytą termodinaminio sezoninio efektyvumo nustatymo metodą nustatytas sumodeliuotos termohidrodinaminių kontūrų sistemos efektyvumas $TSE = 0,22$. Palyginus su atskaitiniais etalonais, nustatyta, kad nagrinėjamos sistemos efektyvumas teoriškai gali būti padidintas 2,14 karto. Pasinaudojant apskaičiuotais P1 prioriteto faktoriais, nustatyta, kad tikslinga nagrinėti sistemos funkcionavimą išorės oro temperatūrai esant tarp $[-2; +12]^{\circ}\text{C}$ dėl žymaus poveikio TSE rodikliui.

2. Atlikus sistemos suskaidymą į posistemius, nustatyti jų termodinaminiai sezoniniai efektyvumai. Palyginus su atskaitiniais etalonais, nustatyta, kad nagrinėjamų posistemių efektyvumas gali būti padidintas. Pasinaudojant prioriteto faktoriumi P2 nustatyta, kad didžiausią neigiamą poveikį turi patalpų vėsinimo posistemis ($D = 0,38$). Pagal prioriteto faktorių P0 palyginamos galimos posistemių alternatyvos ir parenkama funkcionalumą tenkinanti opcija. Pakeitus posistemę, sistemos efektyvumas padidinamas iki $TSE = 0,37$.

3. Suskaidžius didžiausią poveikį sistemos TSE turintį vėsinimo posistemį su adsorbcine šaltio mašina į komponentų grupes, pritaikytas išplėstinės TA metodas. Pasinaudojant prioriteto faktoriumi P3, nustatyta, kad šilumos gamybos ir buferinės talpos grupės dėl tarpusavio sąveikos labiausiai neigiamai veikia kitų komponentų grupių efektyvumą.

4. Pasinaudojant sudarytais komponentų termodinaminės analizės modeliais, nustatytas termodinaminio efektyvumo kitimas nepriklausomai nuo apsupties sąlygų. Gauti rodikliai yra tinkami integruoti į aukštesnio lygmens (komponentų grupės, posistemių, sistemos) skaičiavimus. Pasinaudojant prioriteto faktoriumi P4, nustatyta, kad tikslinga detaliau analizuoti vėsinimo terminalą, saulės kolektorių ir akumuliacinę talpą. Dėl neaiškios termodinaminių nuostolių kilmės tolesnei analizei pasirenkamas akumuliacinės talpos komponentas. Pateiktas tiekiamo oro pašildymo komponento analizės atvejis rodo, kad TSE rodiklis nėra tapatus vidutiniam termodinaminiam efektyvumui.

5. Pasinaudojant lokalaus entropijos generavimo identifikavimo metodu, kritiniais akumuliacinės talpos funkcionavimo periodais identifikuojami dominuojantys termodinaminiai negrįžtamumai, atsirandantys dėl temperatūrų skirtumo. Pasinaudojant metodu nustatyta, kad įkraunant talpą neturinčią temperatūrinio gradiento entropija genruojama visame talpos tūryje dėl natūralios

konvekcijos poveikio. Stratifikuotos talpos atveju – ties didžiausią temperatūrinį gradientą turinčia talpos dalimi. Šios analizės pagalba nustatoma lokacija komponento geometrijoje, kurioje reikalingi prevenciniai veiksmai mažinantys generuojamų termodinaminių negrįžtamumų (entropijos) kieki.

6. Atlikus palyginimą, nustatyta, kad TSE gerinimo metodas yra nuo 1,2 iki daugiau kaip 10 kartų efektyvesnis skaičiuojamųjų resursų atžvilgiu, nei nuoseklus visos sistemos modeliavimas aukštu detalumu.

Bendrosios išvados

1. Atlikus mokslinės literatūros analizę, pastebėta taikomosios termodinaminės analizės taikymo spraga tarp mokslinės ir praktinio taikymo veiklų. Nustatyti ir klasifikuoti taikymo trukdžiai. Esminiai trukdžiai: pateikiami rezultatai neatskleidžia metodų praktinės vertės, neaišku, kaip tobulinti sistemas naudojantis termodinamine analize, skaičiuojamosios programinės įrangos stoka, skirtingos apsupties sąlygų interpretacijos ir kita. Surinkta teorinė medžiaga metodikai parengti.

2. Sudarytas termodinaminio sezoninio efektyvumo (TSE) vertinimo metodas sistemai, susidedančiai iš termohidrodinaminių kontūrų, tinkamas atlikti analizę kintančioms apsupties sąlygoms. Metodikos gaunami svorio faktoriai yra panaudojami identifikuojant kritinius periodus ir nustatant detalesnės analizės prioritetus. Sudaryta veiksmų seka agreguoti atskirų komponentų efektyvumo rodiklius, išreiškia visos grandinės termodinaminį sezoninį efektyvumą.

3. Sudarytas termodinaminio sezoninio efektyvumo rodiklio gerinimo metodas padeda nuosekliai pasirinkti reikiamą modelio detalumą. Taikant metodą, gaunamos mažesnės skaičiuojamosios sąnaudos. Skirtinguose analizės lygiuose sąnaudų mažinimas siekia nuo 1,2 iki daugiau kaip 10 kartų, lyginant su atveju, kai analizuojami visi sistemos dėmenys be išimties. Pateikiama metodika apibūrinanti termodinaminės analizės metodų pritaikomumą skirtingiems sistemos analizės lygiams.

4. Sudaryta metodika tinkama siekiant nuosekliai didinti sistemos efektyvumą, nustatyti kritinius trikdžius. Suformuota metodika, pasitelkiant kiekybinius ir kokybinius parametrus, padeda sistemingai analizuoti sudėtingas energines sistemas. Analizės detalumo lygis didinamas nuosekliai, o prioritetų nustatymo metodai padeda koncentruotis į didžiausią įtaką sistemos sezoniniam efektyvumui turinčius elementus ir laiko žingsnius. Metodikoje naudojamas sudarytas realaus tobulinimo potencialo dydis padeda išreikšti fiziškai įmanomą komponento tobulinimo ribą ir pagal tai nustatyti nuodugnesnės analizės tikslumą.

5. Pritaikius sudarytą metodiką termohidrodinaminių kontūrų sistemos atveju tyrimui, sistemos TSE rodiklis padidintas nuo 0,22 iki 0,37. Šis pokytis susidaro nustačius kritinį posistemį ir jo elementus bei pakeitus juos aukštesnio efektyvumo dėmenimis. Tokiu atveju sunaikintos eksergijos kiekis sumažėja 19,2 % nuo pradinio kiekio. Iš etaloninių dydžių sudaryta atskaitos skalė leidžia analizuoti TSE rodiklių kitimo ribas konkrečios sistemos arba posistemio atveju. Nagrinėtu atveju efektyvumo ribos kinta nuo 0,06 (*blogos* sistemos etalonas) iki 0,49 (*geros* sistemos etalonas).

Rekomendacijos

Dėl apimčių apribojimo ir termodinaminės analizės spragos kompleksiskumo nėra galimybes išspręsti visų literatūros analizėje identifikuotų problemų ir pateikti išbaigtos technologijos taikant termodinaminę analizę inžinerinėje praktikoje. Dėl šios priežasties pateikiamos rekomendacijos tolesnei veiklai:

1. Nustatyta termodinaminės analizės taikymo spraga turėtų būti plačiau analizuojama siekiant nukreipti tyrėjų pastangas platesniam ATD metodų pritaikomumui ir bandos lygio augimui.
2. Pateiktas sistemingas termodinaminės analizės metodų taikymo procesas, pateikiantis veiksmų seką, vedančią į sistemos efektyvumo didinimą, gali būti panaudotas kaip gerosios praktikos pavyzdys kompleksinių sistemų analizės standartizavimui.
3. Suformuotas TSE nustatymo metodas ir apibrėžta skaičiavimo metodika termodinaminės sistemos analizei gali būti integruoti į skaičiuojamuosius programines įrangos įrankius. Tokiu būdu suformuojama technologija siekiant sėkmingai taikyti termodinaminę analizę nagrinėjant termohidrodinaminių kontūrų sistemas.

Literatūra ir šaltiniai

- 2009/28/EC Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC [žiūrėta 2018-05-12]. Prieiga internetu: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32009L0028>
- 2010/31/EU Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. [žiūrėta 2018-05-12]. Prieiga internetu: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32010L0031>
- Afgan N, Carvalho M, Hovanov N. 2017. Energy system assessment with sustainability indicators. *Energy Policy* 2000;28(9):603–612. Volume 28, Issue 9, ISSN 0301-4215, DOI: 10.1016/S0301-4215(00)00045-8
- Ahmadi P, Dincer I, Rosen M. 2017. Optimization of Energy Systems. Wiley. ISBN-10: 111889443X. 472 p.
- Angelis, A; Papadopoulos, A. M. 2009. Application of multicriteria analysis in designing HVAC systems, *Energy and Buildings* 41(7): 774–780.
- Altshuller G. 1994. The Art of Inventing (And Suddenly the Inventor Appeared). Translated by Lev Shulyak. Worcester, MA: Technical Innovation Center. ISBN 0-9640740-1-X
- Altuntop, N.; Kilik, Z.; Ozceyhan, V.; Kincay, O. 2006. Effect of water inlet velocity on thermal stratification in a mantled hot water storage tank, *International Journal of Energy Research* 30(3): 163–176.

- American Society for Testing and Materials (ASTME2013-12). Standard practice for constructing FAST diagrams and performing function analysis during value analysis study
- Andersen E; Furbo S.; Hampel, M.; Heidemann, W.; Müller-Steinhagen, H. 2008. Investigation on stratification devices for hot water heat stores, *International Journal of Energy Research* 32(3): 255–263.
- Angelotti A, Caputo P, Solaini G. 2012. Steady versus dynamic exergy analysis: The case of an air source heat pump. *Int. J. of Exergy*. 11. 460 - 472. 10.1504/IJEX.2012.050256.
- Asada H, Boelman E. 2004. Exergy analysis of a low temperature radiant heating system. *Building Services Engineering Research and Technology* 25 197-209.
- AspenPlus [žiūrėta 2018-05-12]. prieiga per internetą: <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-plus>
- Badescu V. 2007. Optimal control of flow in solar collectors for maximum exergy extraction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Elsevier Vol 50. 4311–4322p.
- Banks J, Gibson R. 1997. Don't simulate when... 10 rules for determining when simulation is not appropriate. 29. 30-32.
- Barauskas R, Kačianauskas R, Belevičius R. 2004. *Baigtinių elementų metodo pagrindai*. ISBN: 9986-05-792-2. 612p.
- Bejan A, 1988a. A second look at the second law. *Mechanical Engineering*. (ISSN 0025-6501), vol. 110, May 1988, p. 58-65
- Bejan A. 1988b. *Advanced engineering thermodynamics*. New York: Wiley.
- Bejan A. 1996. Entropy generation minimization: The new thermodynamics of finite size devices and finite time processes. CRC Press. 400 p. ISBN: 0849396514.
- Bejan A. 2001, Thermodynamic optimization of geometry in engineering flow systems, *Exergy, An International Journal*, Volume 1, Issue 4, 2001, Pages 269-277, ISSN 1164-0235, DOI: 10.1016/S1164-0235(01)00028-0
- Bejan A. 2016. *Advanced Engineering Thermodynamics* DOI: 10.1002/9781119245964.ch3.
- Biekša D 2008 Pastato Inžinerinių Sistemų Procesų Integravimo Vertinimas Taikant Eksergijos Kriterijų. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- Biekša D; Martinaitis V 2007. Pastato inžinerinių sistemų tyrimas taikant ekserginį sistemų vertinimo metodą. *Energetika*. 2007, Issue 4, p84-89. 6p.
- Bielskus J 2016. Saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos termodinaminio ir funkcinio efektyvumo tyrimas. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas
- Bielskus J; Januševičius K; Martinaitis V. Vakuuminių ir plokščiųjų saulės kolektorių sistemų ekserginių efektyvumų palyginimas. *Mokslas - Lietuvos ateitis : Aplinkos apsaugos inžinerija = Science - Future of Lithuania : Environmental protection engineering*. Vilnius: Technika. ISSN 2029-2341. T. 5, Nr. 4 (2013), p. 404-409. DOI: 10.3846/mla.2013.64

Blumberga A., Blumberga D., Bazbauer G, Davidsen P, Moxnes E., Zen I., Baris A., Dāce E, Berzina A. 2011. System Dynamics for Environmental Engineering Students . Riga: Institute of Environmental Protection and Thermal Systems, Riga Technical University, 2011. 351 p. ISBN 9789934819629.

Bocken N, Rana P, Short S. 2015 Value mapping for sustainable business thinking, *Journal of Industrial and Production Engineering*, 32:1, 67-81, DOI:10.1080/21681015.2014.1000399EN12973

Boelman E, Itard L, Sakulpipatsin P, Luscuere P, Van Der Kooi H. 2009. Functional exergy efficiency at near-environmental temperatures, *ASHRAE Trans.* 115 (2009) 748–759.

Borel L, Favrat D. 2010. Thermodynamics and Energy Systems Analysis: From Energy to Exergy (Engineering Sciences-Mechanical Engineering) Borel, 2005

Brodyansky VM, Sorin MV, Le Goff P. The efficiency of industrial processes: exergy analysis and optimization. Amsterdam: Elsevier; 1994.

Building Research Establishment (BRE) 2016 BREEAM new construction technical manual. (2016). 1st ed. [žiūrėta 2018-05-12]. Prieiga internetu: http://www.breem.org/breemGeneralPrint/breem_non_dom_manual_3_0.pdf

Carnot, N. L. S./1824/Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a développer cette puissance/Bachelier, Paris, 1824; Fox, R. (ed.), Librairie Philosophique J. Vrin, Paris 1978/In French (also *Reflections on the Motive Power of Heat, American Society of Mechanical Engineers*, 1943)/Exergy, Thermodynamics, Heat//

CIB 1982. Working with the performance approach in buildings. International council for building research studies and documentation.

CIBSE. 2015. Applications Manual (AM) 11: Building Performance Modelling. London: The Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE).

Cycle Tempo [žiūrėta 2018-05-12]. prieiga per internetą: <http://www.asimptote.nl/software/cycle-tempo/>

Clausius, R. 1867 The mechanical theory of heat. translated by Hirst, van Voorst, London. Exergy, Thermodynamics

Collier, W. (2011). Agile Analytics: A Value-Driven Approach to Business Intelligence and Data Warehousing. Pearson Education. pp. 121 ff. ISBN 9780321669544.

Costa V. Antônio F. 2016. On the exergy balance equation and the exergy destruction. *Energy*. Volume 116, Part 1, 2016, Pages 824-835, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.015>.

Croll A, Yoskovitz B 2013, Lean Analytics: Use Data to Build a Better Startup Faster (Lean Series)

DGNB .dgnb.de 2018. Website of DGNB - Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen. www.dgnb.de. Offering information about the DGNB and its purpose, structures, programs and activities, including DGNB certification, partner organisations and projects.

Dincer I . 2002. The role of exergy in energy policy making. *Energy Policy* 30 137-149.

Dincer I, Rosen M. 2015. Exergy Analysis of Heating, Refrigerating and Air Conditioning: Methods and Applications. Elsevier 1-387.

Dincer I., Rosen M A 2013. Exergy– Energy, Environment and Sustainable Development (second edition). Elsevier.

Du D, Ko K 2014. Theory of computational complexity. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2014. ISBN 978-0-471-34506-0. 514p.

EnergyPlus 2016 Regional weather data base. [žiūrėta 2016-05-12]. Prieiga per internetą:: https://energyplus.net/weather-region/europe_wmo_region_6/LTU%20%20

Enrico S, Zullo F. 2011. Is sustainability a thermodynamic concept?. *Int. J. Exergy* M.Eng. in Mechanical Engineering, University of Roma PhD in Mech. Eng. ASME Fellow. 8. 68-85. 10.1504/IJEX.2011.037215.

Erkal H, Kebapci S. 2009. Resistance to Change : A Constructive Approach for Managing Resistant Behaviors (Dissertation). [žiūrėta 2018-05-12]. Prieiga per internetą: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:hik:diva-1813>

Fu, P Wang N, Wang L, Morozuk T, Yang Y, Tsatsaronis G. 2016. Performance degradation diagnosis of thermal power plants: A method based on advanced exergy analysis. *Energy Conversion and Management*. 130. 10.1016/j.enconman.2016.10.054.

Gallo W Milanez L F . 1990. Choice of a reference state for exergetic analysis. *Energy* 15 113-121.

Gasparatos A . El-Haram Mohamed, Horner Malcolm. 2009. Assessing the sustainability of the UK society using thermodynamic concepts: Part 2. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 956-970. Volume 13, Issue 5, June 2009, Pages 1074-1081

Gibbs, J. W./1876/A Method of Geometrical Representation of the Thermodynamic Properties of Substances by means of Surfaces/Trans. Conn. Acad. Arts Sci., vol. 3, pp. 108-248 (1876) and pp. 343-524 (1878) or The Collected Works of J. Willard Gibbs, Longmans Green and Co., 1906, 1931//Exergy, Thermodynamics

Giedrė S 2011. Kogeneracinės jėgainės šilumos akumuliacinės talpos veikimo režimų tyrimai daktaro disertacija technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija (06T). Vilniaus gedimino technikos universitetas. Vilnius 2011, Leidykla Technika.

Gogi A; Tako A; Robinson S. 2015. A preliminary study on the role of simulation models in generating insights. Proceedings - Winter Simulation Conference. 2015. 3618-3629. 10.1109/WSC.2014.7020191.

Gouy, G. Sur les transformation et l'équilibre en thermodynamique. *Compte.Rendu.Acad.Sci.Paris* 1889, 108,507–509.

Gourmelon, S. Thery Hetreux R, Floquet, P, Baudet, P, Baudouin, O, Stroesser, O. 2013. Exergy Analysis within Process Simulation Software: a Tool for Process Optimization.

Gudzinskas J, Lukoševičius V, Martinaitis V, Tuomas E. 2011, šilumos Vartotojų Vadovas, Lietuvos šilumos tiekėjų asociacija. ISBN 978-609-95258-0-8. 295p.

Gundersen T 2011 AN INTRODUCTION TO THE CONCEPT OF EXERGY AND ENERGY QUALITY. Lecture notes. NTNU: Norwegian University of Science and

- Technology. [žiūrėta 2018-05-12]. prieiga per internetą: <http://www.ivt.ntnu.no/ept/fag/tep4115/innhold/Exergy%20Light%20Version%204.pdf>
- Hatamura Y 2006. Decision –Making in Engineering Design. American Society of Mechanical Engineers. ISBN-10: 0791802469
- Hepbasli, A. 2012. Low exergy (LowEx) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* - 16. 10.1016/j.rser.2011.07.138.
- Hepbasli, A. 2012. Low exergy (LowEx) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* -.DOI: 16. 10.1016/j.rser.2011.07.138.
- Herrmann, Jeffrey 2015 Engineering Decision Making and Risk Management. 2015. Wiley. ISBN-10: 1118919335
- Herwig H 2010 Second Law Analysis of Momentum and Heat Transfer Problems: Guidelines for Future Research Directions
- Herwig H, Schmandt B. 2014. How to Determine Losses in a Flow Field: A Paradigm Shift towards the Second Law Analysis. *Entropy Journal*. DOI:10.3390/e16062959.
- Herwig H, Weterodt T 2011 Second law analysis of momentum and heat transfer in unit operation. *International Journal of heat and mass transfer* Volume 54, Issues 7–8, 2011, Pages 1323-1330, ISSN 0017-9310, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.11.055.
- Herwig H, Weterodt T. 2012 Heat transfer and its Assesment . *Journal of Heat transfer – Theoretical analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems* DOI: 10.5772/1756 ISBN: 978-953-307-226-5
- Herwig, H, Kock, F. 2007. Direct and Indirect Methods of Calculating Entropy Generation Rates in Turbulent Convective Heat Transfer Problems. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*. 43. 207-215. 10.1007/s00231-006-0086-x.
- Herwig, H, Schmandt, B. 2013. Drag with External and Pressure Drop with Internal Flows: A New and Unifying Look at Losses in the Flow Field Based on the Second Law of Thermodynamics. *Fluid Dynamics Research*. 45. DOI: 10.1088/0169-5983/45/5/055507.
- Herwig, H.; Weterodt, T. 2013. Second law analysis for sustainable heat and energy transfer: the entropic potential concept, in International Conference on Applied Energy.
- Hopfe C. 2009. Uncertainty and sensitivity analysis in building performance simulation for decision support and design optimization. PhD Thesis. TU Eindhoven. Netherlands
- Howard R 1966 "Information Value Theory," *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, vol. 2, no. 1, pp. 22-26, Aug. 1966. DOI: 10.1109/TSSC.1966.300074
- Incropera F, Dewitt D, Bergman T, Lavine A. 2006. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6-th edition. J. Wiley, 2002. 1070 p.
- IPCC 2018. Intergovernmental panel on climate change. Global Warming of 1.5 oC. Summary for policy makers. [žiūrėta 2018-05-12]. prieiga per internetą: https://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf

Jahangirian M, Taylor S, Young T, Robinson S 2016. Key performance indicators for successful simulation projects. *Journal of the Operational Research Society advance* online publication, 6 July 2016; doi:10.1057/jors.2016.1.

Jaluria Y .; Gupta S. 1982. Decay of thermal stratification in a water body for solar energy storage, *Solar Energy* 28(2): 137–143.

Jansen S2013; Exergy in the built environment. The added value of exergy in the assessment and development of energy systems for the built environment. Phd Thesis.

Jones M, Ledinger S. 2010. Energy Modeling of a High Performance Building in the U.A.E. for Sustainability Certification. *Proceedings of the Tenth International Conference for Enhanced Building Operations*, Kuwait, October 26-28, 2010

Jones M. 2010. Visualization of thermodynamics and energy performance for complex building system simulation. *Proceedings of the Tenth International Conference for Enhanced Building Operations*, Kuwait, October 26-28, 2010

Jungtinės tautos 1992. Agenda 21. United Nations Conference on Environment & Development Rio de Janeiro, Brazil. [žiūrėta 2018-05-12]. prieiga per internetą: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf>

Jungtinės tautos 1998. Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change. [žiūrėta 2018-05-12]. prieiga per internetą: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>

Jungtinės tautos 2015 . PARIS AGREEMENT. [žiūrėta 2018-05-12]. prieiga per internetą: https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-03%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf

Jungtinės tautos, 2017. Darnaus vystymosi tikslai. [žiūrėta 2018-05-12]. prieiga per internetą: <https://www.globalgoals.org/>

Kaufman, J. 1990, Value Engineering for the Practitioner, North Carolina State University. United States. ISBN-10: 1560490004

Kelly, S.; Tsatsaronis, G.; Morosuk, T. 2009. Advanced exergetic analysis: approaches for splitting the exergy destruction into endogenous and exogenous parts, *Energy* 34: 384–391. DOI: 10.1016/j.energy.2008.12.007

Kerdan, I. 2017. Optimisation of building energy retrofit strategies using dynamic exergy analysis and exergoeconomics. PhD Thesis. Energy Institute The Bartlett School of Environment, Energy and Resources University College London

Kharrazi A, Kraines S, Hoang L, Yarime M 2014. Advancing quantification methods of sustainability: A critical examination energy, exergy, ecological footprint, and ecological information-based approaches. *Ecological Indicators* 37 (2014) 81–89 . DOI: 10.1016/j.ecolind.2013.10.003

Kind M, Martin H 2010. VDI Heat Atlas. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Vokietija. ISBN 978-3-540-77876-9. 1584 pages.

Klein, S. Nellis, G. 2011. Thermodynamics. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511994883

Kock F, Herwig H. 2005 Entropy production calculation for turbulent shear flows and their implementation in cfd codes. *International journal of heat and fluid flow*. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Volume 26, Issue 4, 2005, Pages 672-680, ISSN 0142-727X, DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2005.03.005.

Kofoworola, O. F; Gheewala, S. H. 2009. Life cycle energy assesment of a typical Office building in Thailand, *Energy and Buildings* 41(10): 1076–1083.

Korbee H, Smolders B, Stofberg F, 1979 "Environment first when working out a global zoning plan" TU Delft, afd. Bouwkunde, in: BOUW, no. 22, 27 oktober 1979

Komisijos komunikatas europos parlamentui, tarybai, europos ekonomikos ir socialinių reikalų komitetui ir regionų komitetui. ES šildymo ir vėsinimo strategija. Europos komisija. 2016.

Kotas Tadeusz. 1985. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. Paragon Publishing. ASIN: B00ZVP83WG

Launder B; Spalding B 1974. "The Numerical Computation of Turbulent Flows". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 3 (2): 269–289. doi:10.1016/0045-7825(74)90029-2.

Lawson, B. 1997, How designers think. Architectural Press, Elsevier, Oxford, Great Britain

LEED 2012 U.S. Green Building Council. LEED – leadership in energy and environmental design; 2012

Leoncini L, Baldi M.G. 2015. Exergy as a Parameter for Building Energy Assessment. *Journal of Civil Engineering and Architecture* 9 (2015) 741-748 doi: 10.17265/1934-7359/2015.06.012 and *Architecture* 9 (2015) 741-748 doi: 10.17265/1934-7359/2015.06.012

LST EN 12973:2000 Vertės Vadyba. Lietuvos standartizacijos departamentas

LST EN 1325:2014 Vertės vadyba. Aiškinamasis žodynas. Terminai ir apibrėžtys Value Management – Vocabulary – Terms and definitions EN 1325:2014 Lietuvos standartizacijos departamentas.

LST EN 16271:2013 Vertės vadyba. Funkcinė poreikio išraiška ir funkcinis darbų aprašas. Poreikio reiškimo ir patvirtinimo perkant arba gaunant gaminį reikalavimai Value management - Functional expression of the need and functional performance specification - Requirements for expressing and validating the need to be satisfied within the process of purchasing or obtaining a product EN 16271:2012 Lietuvos standartizacijos departamentas

LST EN ISO 9001:2008 „Kokybės vadybos sistemos. Reikalavimai" Lietuvos standartizacijos departamentas

Lucia U 2014, The Gouy-Stodola Theorem in Bioenergetic Analysis of Living Systems (Irreversibility in Bioenergetics of Living Systems), *Energies* 2014, 7, 5717-5739; doi:10.3390/en7095717

Macdonald I A. 2002 Quantifying the Effects of Uncertainty in Building Simulation. PhD thesis Dept. of Mechanical Engineering University of Strathclyde

- Manzi T, Lucas K, Jones T, Allen J. 2009 Social sustainability in urban areas: communities, connectivity and the urban fabric. Washington, DC: Earthscan;.
- Marmolejo-Correa D, Gundersen T. 2012. A comparison of exergy efficiency definitions with focus on low temperature processes. *Energy*. 44. 477–489. 10.1016/j.energy.2012.06.001.
- Martinaitis V 1999 THE DEMAND FOR EXERGY DURING THE LIFE CYCLE OF DWELLING HOUSES, *Statyba*, 5:1, 53-58, DOI: 10.1080/13921525.1999.10531433
- Martinaitis V 2001. Pastato gyvavimo ciklo termodinaminės analizės modelis. Monografija. Vilnius Technika 2001. ISBN 9986-05-435-4. 172p.
- Martinaitis V, Lukoševičius V, 2014. Šilumos gamyba deginant kurą. Technika, Vilnius. ISBN 9786094576324. 232p.
- Martinaitis V, Streckienė G, Biekša D, Bielskus J, 2016 The exergy efficiency assessment of heat recovery exchanger for air handling units, using a state property – Coenthalpy, *Applied Thermal Engineering*, Volume 108, 2016, Pages 388-397, ISSN 1359-4311, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2016.07.118 .
- Martinaitis V, Streckienė G. 2016. Concerning exergy efficiency evaluation of heat recovery exchangers for air handling units. *International Journal of Exergy* 20(3):381-404 January 2016 DOI: 10.1504/IJEX.2016.077432
- Martinaitis. V. 2007. Termodinaminė analizė. Vilnius: Technika, 208 p.
- Masanori S 2009. Exergy concept and its application to the built environment. *Building and Environment* 44 (2009) 1545–1550.
- Mettler T (2011). Maturity assessment models: a design science research approach. *Int. J. Society Systems Science*, Vol. 3, Nos. 1/2, 2011
- Misevičiūtė, V. 2011. Procesų integravimo vėdinimo įrenginiuose galimybių vertinimas. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 109 p.
- Miseviciute V, Motuzienė V, Valancius K. 2018. The application of the Pinch method for the analysis of the heat exchangers network in a ventilation system of a building. *Applied Thermal Engineering*. 129. 772-781 DOI:10.1016/j.applthermaleng.2017.10.051.
- Miseviciute V, Valancius K, Motuzienė V, Rynkun G. 2017. Analysis of exergy demand for air heating of an air handling unit. *Energy Efficiency*. 10. 989–998. DOI:10.1007/s12053-016-9499-7.
- Moody D, Walsh P, 1999. Measuring The Value Of Information: An Asset Valuation Approach. The Seventh European Conference on Information Systems (ECIS'99), Copenhagen Business School, Frederiksberg, Denmark, 23-25 June, 1999.
- Moran, M, Shapiro H, 1998. Fundamentals of engineering thermodynamics: SI version. Chichester: John Wiley.
- Morozyuk T, Tsatsaronis G. 2013. Strengths and Limitations of Advanced Exergetic Analyses. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE). 6. 10.1115/IMECE2013-64320.

Morozyuk T, Tsatsaronis G. 2018. Advanced exergy-based methods used to understand and improve energy-conversion systems. *Energy*. 169. DOI:10.1016/j.energy.2018.11.123.

Motuzienė V. 2010. Istiklinimo itakos viešųjų pastatų energijos poreikiams kompleksinė analizė. Daktaro disertacija technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija (06T). Vilnius 2010, Leidykla Technika.

Müller A. Kranzl L. Tuominen P. Boelman E. Molinari M. Entrop A. G. 2011. Estimating exergy prices for energy carriers in heating systems: Country analyses of exergy substitution with capital expenditures. *Energy and Buildings* 43 3609-3617.

Müller-Roterberg C. 2018. Handbook of Design Thinking. Kindle Direct Publishing ISBN: 978-1790435371

Murman E, McManus H, Weigel A, Madsen B. 2012 Introduction to Lean Six Sigma Methods. January IAP 2012. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, [žiūrėta 2018-05-12]. Prieiga internet: <https://ocw.mit.edu>.

Naterer G, Camberos J. 2008. Entropy-based design and analysis of fluids engineering systems. 10.1201/9781420006919.

Oberkampf W, Trucano T 2002 Verification and validation in computational fluid dynamics, *Progress in Aerospace Sciences*, Volume 38, Issue 3, 2002, Pages 209-272, ISSN 0376-0421, DOI: 10.1016/S0376-0421(02)00005-2.

Obert E F. – 1960 Concepts of thermodynamics. 1960 MCGRAW-HILL Book Company, Incorporated, 1960

Osterwalder A, Pigneur Y. 2003, "Modeling Value Propositions in e-business", ICEC '03 Proceedings of the 5th international conference on Electronic Commerce, pp 429-436

Patankar, S V. (1980). Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Publishing Corporation. ISBN 0891165223.

Penkuhn, M, Tsatsaronis G. 2017. A decomposition method for the evaluation of component interactions in energy conversion systems for application to advanced exergy-based analyses. *Energy*. 133. 10.1016/j.energy.2017.03.144.

Phillis YA, Kouikoglou VS. Fuzzy measurement of sustainability. New York: Nova Science Publishers, Inc. 2009

Pons M. 2009. On the Reference State for Exergy when Ambient Temperature Fluctuates, 12(3), pp.113–121.

Pryor R. W. 2009 Multiphysics modeling using COMSOL: a first principles approach. Jones & Bartlett Learning. ISBN 9780763779993. 852 p.

Project Management Institute (PMI) 2017. AGILE PRACTICE GUIDE Project Management Institute, Inc. 14 Campus Boulevard Newtown Square, Pennsylvania 19073-3299 USA

ProSimPlus [žiūrėta 2018-05-12]. prieiga per internetą: <http://www.prosim.net/en/software-prosimplus-steadystate-simulation-and-optimization-of-processes-1.php>.

- Rant Z. 1963 'Heiztechnik Und Der Zweite Hauptsatz Der Thermodynamik', Gaswarme, Vol. 12, pp.297–304.
- Reddy A. 2011. Applied Data Analysis and Modeling for Energy Engineers and Scientists. 10.1007/978-1-4419-9613-8.
- Redecker C, Herwig H. 2012. Assessing heat transfer processes: A critical view at criteria based on the second law of thermodynamics. *Forschung im Ingenieurwesen*. 76. 10.1007/s10010-012-0156-9.
- Robinson S. 2011. Choosing the right model: Conceptual modeling for simulation. Proceedings - Winter Simulation Conference. 1423-1435. 10.1109/WSC.2011.6147862.
- Robinson, S. 2015. Designing Simulations that are better than the Rest: Conceptual Modelling for Simulation.
- Rocco M, Colombo E, Enrico S. 2014. Advances in exergy analysis: A novel assessment of the Extended Exergy Accounting method. *Applied Energy*. 113. 1405-1420. DOI:10.1016/j.apenergy.2013.08.080.
- Rosen M. 2013. Engineering and Sustainability : Attitudes and Actions. , pp.372–386.
- Rosen, M, Dincer, I. (2001). Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development. *Exergy, An International Journal*. 1. 3-13. 10.1016/S1164-0235(01)00004-8.
- Rother M; Shook J 1999. Learning to See: value-stream mapping to create value and eliminate muda. Brookline, Massachusetts: Lean Enterprise Institute. ISBN 0-9667843-0-8.
- Rozenblit L, Keil F, 2002. The misunderstood limits of folk science: an illusion of explanatory depth. *Cognitive science journal*. Volume26, Issue5 September 2002 Pages 521-562. 10.1207/s15516709cog2605_1
- Saaty T 1980. The Analytic Hierarchy Process; Planning, Priority Setting, Resource Allocation. McGraw-Hill, New York, 1980, 192 p
- Sakulpipatsin P 2008; EXERGY EFFICIENT BUILDING DESIGN. PhD Thesis Technical University of Eindhoven Netherlands
- Sakulpipatsin P, Itard L, Van der Kooi H, Boelman E, Luscuere P. 2010. An exergy application for analysis of buildings and HVAC systems. *Energy and Buildings*. 42. 90-99. 10.1016/j.enbuild.2009.07.015.
- Schmidt D. 2009. Low exergy systems for high-performance buildings and communities. *Energy and Buildings* 41(3):331-336 • March 2009 DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.10.005
- Schmidt D. 2009. Low exergy systems for high-performance buildings and communities. *Energy and Buildings*. 41. 331-336. 10.1016/j.enbuild.2008.10.005 .
- Sciacovelli A, Verda, V, Sciubba E, 2015. Entropy generation analysis as a design tool — A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, pp.1167–1181. Available at: DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.104
- Sciubba E, Wall G. 2007. A brief Commented History of Exergy from the Beginnings to 2004. *Int. J. of Thermodynamics*. Vol. 10 (No. 1), pp. 1-26, March 2007. ISSN 1301-9724

Shukuya M, Hammache A. 2002. Introduction to the concept of exergy - For a better understanding of low-temperature-heating and high-temperature-cooling systems. VTT Tiedotteita – Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus. 2158. 3-41.

Simon, H 1997., Administrative Behavior, 4th edition, The Free Press, New York, 1997.

Sipser M 2006, Introduction to the Theory of Computation (2nd ed.), USA: Thomson Course Technology, ISBN 0-534-95097-3. 440p.

Spanner, D. 1974. Introduction to Thermodynamics. Academic Press, London.

Stirling, W C. 2003 Satisficing Games and Decision Making, Cambridge University Press, Cambridge, 2003.

Stodola, A. Steam Turbine; Translated by Loewenstein, L.C.; Van Nostrand: New York, NY, USA, 1905.

Stougie L, Van der Kooi H. 2011. THE RELATION BETWEEN EXERGY AND SUSTAINABILITY ACCORDING TO LITERATURE. 2nd International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium (ELCAS2) 19 - 21 June, 2011, NISYROS – GREECE

Szargut J. 1957. Potential balance in chemical processes (in Polish). Arch. Budowy Maszyn 4

Szargut, J.; Morris, D; Steward, F. 1988. Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes. Hemisphere Publishing Corporation. Amsterdam: Springer. 332 p. ISBN: 3540188649

Taiichi O. 1998. Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production, Productivity Press, ISBN 978-0-915299-14-0

Tait, P. G./1868/Sketch of thermodynamics/Edinburgh University Press, Edinburgh, p.100//Exergy, Thermodynamics//

Teres-Zubiaga J, Jansen, S, Luscuere, P.G. Sala, J.M.. (2013). Dynamic exergy analysis of energy systems for a social dwelling and exergy based system improvement. *Energy and Buildings*. 64. 359–371. 10.1016/j.enbuild.2013.05.034.

Terlizzese T. 2018. Second law analysis and simulation techniques for the energy optimization of buildings.

The DGNB as a protoinstitution for sustainable certification in Denmark | [žiūrėta 2018-05-12].
prieiga per internetą:
https://www.researchgate.net/publication/280155003_The_DGNB_as_a_proto-institution_for_sustainable_certification_in_Denmark

Thomas PC, Rao GS, Wong J 2017. Load Calculation and Energy Simulation: The link between design and operation for building design. Proceedings of the 15th IBPSA Conference San Francisco, CA, USA, Aug. 7-9, 2017.
<https://doi.org/10.26868/25222708.2017.774>

Torio H, Angelotti A, Schmidt, D. 2009. Exergy analysis of renewable energy-based climatisation systems for buildings: A critical view. *Energy and Buildings*. 41. 248-271. 10.1016/j.enbuild.2008.10.006.

- Torio H, Schmidt D 2011. Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities. Annex 49 Summary report. FRAUNHOFER VERLAG
- Torio H. 2012 Comparison and optimization of building energy supply systems through exergy analysis and its perspectives . PhD Thesis Fraunhofer.
- Trcka M, Hensen J. (2010). Overview of HVAC system simulation. *Automation in Construction*. 19. 93-99. 10.1016/j.autcon.2009.11.019.
- Trčka M 2008. Co-simulation for Performance Prediction of Innovative Integrated Mechanical Energy Systems in Buildings. PhD thesis TU Eindhoven. Netherlands
- Tsatsaronis G 2007. Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. *Energy* 32 (2007) 249–253
- Tsatsaronis G, Czesla, F. 1999. Strengths and Limitations of Exergy Analysis. 10.1007/978-94-011-4685-2_6.
- Tsatsaronis G, Kelly S, Morozuk T. 2006. Endogenous and Exogenous Exergy Destruction in Thermal Systems. 10.1115/IMECE2006-13675.
- Tsatsaronis G, Morozuk T. 2012. Understanding and improving energy conversion systems with the aid of exergy-based methods. *Int. J. of Exergy*. 11. 518 - 542. 10.1504/IJEX.2012.050261.
- Tsatsaronis G. 1999 Strengths and Limitations of Exergy Analysis. Thermodynamic Optimization of Complex Energy Systems. NATO Science Series Volume 69, 93-100 p.
- United Nations General Assembly 2015, Transforming our world : the 2030 Agenda for Sustainable Development, 21 October 2015, A/RES/70/1, [žiūrėta 2018-05-12]. Prieiga internetu: <http://www.refworld.org/docid/57b6e3e44.html>
- Utlu Z., Hepbasli A. 2007. Parametrical investigation of the effect of dead (reference) state on energy and exergy utilization efficiencies of residential–commercial sectors: A review and an application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (2007) 603–634.
- Vaitiekūnas P 2007. Šilumos mainų matematinis modeliavimas. Technika, Vilnius. ISBN9789955280774 DOI10.3846/878-S. 292p.
- Van Gool, W., 1997. Energy policy: fairly tales and factualities. Innovation and Technology-Strategies and Policies, 93e105
- Wall, Göran, Banhatti, Dilip G. 2011. Exergy: A Useful Concept for Ecology and Sustainability. 10.1007/978-3-642-36143-2_28.
- Wang L, Yang Z, Sharma S, Mian A, Lin T, Tsatsaronis G, Maréchal F, Yang Y. 2019. A Review of Evaluation, Optimization and Synthesis of Energy Systems: Methodology and Application to Thermal Power Plants †. *Energies*. 12. DOI:10.3390/en12010073.
- Wang, L Yang Y, Morozuk T, Tsatsaronis G. 2012. Advanced Thermodynamic Analysis and Evaluation of a Supercritical Power Plant. *Energies*. 5. 10.3390/en5061850.
- Weiss M, Newman A. 2011. A guide to writing articles in energy science, *Applied Energy*, Volume 88, Issue 11. Pages 3941-3948, ISSN 0306-2619, DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.04.007.
- Wenterodt T. Herwig H. 2014 The Entropic Potential Concept: a New Way to Look at Energy Transfer Operations. *Entropy Journal*. Vol 16. 2071-2084p.

Womack, J., Jones D, Roos D.(1990) The Machine That Changed The World. Rawson Associates, New York, 1990, 323

Zachar, A.; Farkas, I.; Szlivka, F. 2003. Numerical analyses of the impact of plates for thermal stratification inside a storage tank with upper and lower inlet flows, *Solar Energy* 74(4): 287–302.

Zhou Y, Gong G. 2013. Exergy analysis of the building heating and cooling system from the power plant to the building envelop with hourly variable reference state. *Energy & Buildings*, 56, pp. 94–99. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.09.041

Zmeureanu R, Yu W. X. 2007. Energy and exergy performance of residential heating systems with separate mechanical ventilation. *Energy*. 32. 187-195. DOI:10.1016/j.energy.2006.04.007.

Zoder M; Balke J; Hofmann M; Tsatsaronis, G. 2018. Simulation and Exergy Analysis of Energy Conversion Processes Using a Free and Open-Source Framework—Python-Based Object-Oriented Programming for Gas- and Steam Turbine Cycles. *Energies*. 11. 2609. DOI: 10.3390/en11102609.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Januševičius K; Bielskus J; Martinaitis V. 2019 Functionality assessment of building micro-climate system utilising solar energy in cold climate. *Strojniški Vestnik - Journal of mechanical engineering. Ljubljana: Association of Mechanical Engineers and Technicians of Slovenia*. ISSN 0039-2480. Articles in Press (2019), p. 1–15. [M.kr.:06T; 09T] [Aut. lankų sk.: 1.071] DOI: 10.5545/sv-jme.2018.5910

Martinaitis V; Bielskus J; Januševičius K; Bareika P. 2017 Exergy efficiency of a ventilation heat recovery exchanger at a variable reference temperature. *Mechanika*. Kaunas: KTU. ISSN 1392-1207. Vol. 23, iss. 1 (2017), p. 70–77. [M.kr.:02T; 06T; 09T] [Aut. lankų sk.: 0.571] DOI: 10.5755/j01.mech.23.1.17678

Januševičius K; Streckienė G; Bielskus J; Martinaitis V. 2016 Validation of unglazed transpired solar collector assisted air source heat pump simulation model. *Energy Procedia*. Amsterdam: Elsevier Ltd. ISSN 1876-6102. Vol. 95 (2016), p. 167–174. [M.kr.:06T; 09T] [Aut. lankų sk.: 0.571] DOI: 10.1016/j.egypro.2016.09.039

Januševičius K; Streckienė G; Misevičiūtė V. 2015 Simulation and analysis of small-scale solar adsorption cooling system for cold climate. *International journal of environmental science and development*. Singapore: International Association of Computer Science and Information Technology Press (IACSIT Press). ISSN 2010-0264. Vol. 6, iss.1 (2015), p. 54–60. DOI: 10.7763/IJESD.2015.V6.561

Januševičius K; Streckienė G. 2015 Analysis of air-to-water heat pump in cold climate: comparison between experiment and simulation. *Mokslas – Lietuvos ateitis: Aplinkos apsaugos inžinerija = Science – Future of Lithuania: Environmental protection engineering*. Vilnius: Technika. ISSN 2029-2341. T. 7, Nr. 4 (2015), p. 468–474. DOI: 10.3846/mla.2015.823

Januševičius K; Streckienė G. 2013 Solar assisted ground source heat pump performance in nearly zero energy building in Baltic countries. *Environmental and Climate Technologies*. Warsaw: Versita. ISSN 1691-5208. Vol.11 (2013), p. 48–56. DOI: 10.2478/rtuect-2013-0007

Bielskus J; Januševičius K; Martinaitis V. 2013 Vakuuminių ir plokščiųjų saulės kolektorių sistemų ekserginių efektyvumų palyginimas. *Mokslas – Lietuvos ateitis: Aplinkos apsaugos inžinerija = Science – Future of Lithuania: Environmental protection engineering*. Vilnius: Technika. ISSN 2029-2341. T. 5, Nr. 4 (2013), p. 404–409. DOI: 10.3846/mla.2013.64

Straipsniai kituose leidiniuose

Januševičius K; Bielskus J; Martinaitis V; Streckienė G; Rimdžius D. 2017 Expressing the building energy systems thermodynamic seasonal efficiency. *10th international conference “Environmental engineering”*, April 27–28, 2017, Vilnius, Lithuania : selected papers. Vilnius: VGTU Press, 2017, p. 1–9. DOI: 10.3846/enviro.2017.271

Januševičius K; Bielskus J; Martinaitis V. 2014a Thermodynamic simulation of solar thermal system. *9th International Conference “Environmental Engineering”*, May 22–23, 2014, Vilnius, Lithuania: selected papers CD. Vilnius: Technika, 2014. ISBN 9786094576904, p. 1–9.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

The topic of this thesis is investigated in the context of fluid mechanics as well as the science of heat exchange and thermodynamics. As the importance of sustainable development increases, it becomes necessary to combine the production potential and consumption in energy systems that use renewable energy and fossil fuels. It is important to maintain as large a proportion of renewable resources in the total balance as possible. The analysis and efficiency of these processes in terms of sustainable development is required for implementing the strategic objectives of the European Union formulated in the Directives 2010/31/EU and 2009/28/EC as well as Technology Development Roadmaps that establish the direction and objectives of developing renewable energy for Member States.

Many sources identify losses in energy quality that occur in production devices as critical and having the biggest impact on the efficiency of energy supply chain (Schmidt 2009, Hepbasli 2012). Thermodynamic performance and efficiency is expressed on the basis of the qualitative value and the quality of the energy produced by the selected energy vectors. Many researchers recommend choosing devices that operate in low-temperature mode, the thermodynamic efficiency of which is correspondingly the most efficient due to the low difference between the ambient temperature and the working temperature of the device.

The lack of methods suitable for designing systems that have marginal conditions that change over time was identified. The existing methods focus on determining the proportions of components and barely take into consideration ensuring the general efficiency of a system. There has been little attention given to the level of energy quality and the factors that cause the decrease in energy quality.

Relevance of the thesis

In order to tackle climate change and the consequences thereof, at the initiative of the United Nations since the Conference on Environment and Development held in Rio de Janeiro (1992), the Kyoto Protocol (1997) and Paris Agreement (2015) were signed, addressing the targeted limitations of gas emissions that cause the greenhouse effect. The strategic objectives for 2030 also emphasize the importance of sustainable development (United Nations 2015).

The statistical data provided by the European Union shows that up to 50% of final energy consumption consists of energy demand for buildings (European Commission 2016). This consumption leads to high carbon dioxide emissions that negatively contribute to climate change (IPCC 2018). In terms of the lifecycle, the largest portion of primary energy (from 30-50% to 90%) is used in the engineering systems of a building (Avgelis, Papadopoulos 2009; Kofoworola, Gheewala 2009). Therefore reducing resource consumption in this area can be seen as a strategic measure in the fight against climate change. Intensive energy consumption is also related to inefficient usage of processes that take place in the engineering systems of a building (Misevičiūtė 2015) and the resulting energy losses (Torio 2007). Energy flows that form in buildings differ not only in terms of quantitative, but also qualitative parameters. When analyzing the potential of increasing the efficiency of flows that are supplied to the building and form in the building, it is necessary to apply the method (new to the engineering practice) that identifies the qualitative parameters of energy (Biekša 2008).

Increasing the effectiveness of methods based on the FLT and the SLT allows to plan, design and develop more sustainable engineering systems. These methods allow to properly compare energy flows that are different in terms of SLT, to analyze and ensure the process of sustainable energy development (Dincer, Rosen 2007, Biekša 2008).

The object of research

The object of research is a thermohydrodynamic contour system and the seasonal thermodynamic efficiency of the system.

The aim of the thesis

The aim of this thesis is to develop a method for assessing the seasonal thermodynamic efficiency of a thermohydrodynamic contour system and to develop a methodology for increasing the seasonal efficiency systematically.

The tasks of the thesis

In order to achieve the aim of the thesis, the following objectives should be met:

1. To carry out an analysis of scientific research, determining the gaps in applying the methods of thermodynamic analysis.

2. To design the method for assessing the seasonal thermodynamic efficiency of a system that consists of thermohydrodynamic contours.
3. To identify the level of detail of numeric models that is required in order to objectively assess seasonal indicators.
4. To develop a method for a consistent increase of the efficiency of the system and identifying the critical obstacles.
5. To apply the developed method to the practical investigation in case of the thermohydrodynamic contour system.

The research methods

The following methods were used in the thesis: thermodynamic analysis, extended thermodynamic analysis, minimization of entropy production, systemic analysis, analysis of local entropy minimization. The TRNSYS, IES VE, MATLAB and COMSOL software was used for modelling.

Scientific novelty of the thesis

Over the course of writing this thesis, the following results new to mechanical engineering and thermal engineering were obtained:

1. The method for calculating the thermodynamic seasonal efficiency, suitable for changing reference conditions, was designed.
2. A realistically possible potential for improvement regarding the components of the system was defined.
3. A method for analyzing the system that allows to identify the critical components and periods and to apply corrective action by selecting the adequate level of decomposition and detail of the model was formulated.

Practical value of the research findings

Systematic application of methods of applied thermodynamic analysis when adequate levels of detail for the model and decomposition of the system are selected helps to reduce the costs of performing the analysis. The designed method can be suitable as an example of the process in terms of practical application, process improvement and raising the efficiency and effectiveness of the sequence of the procedures when carrying out the main function. The designed method helps to avoid irrational waste of time and computational costs by directing the efforts to components that influence the TSE the most.

The developed indicators can be independently used to define the performance of the metric system and the components thereof by expressing the critical areas and time steps of the system, subsystems and separate components thereof, where corrective action is required in order to increase efficiency.

The expressed potential for actual improvement allows to determine the necessity of a more detailed analysis of the component and the potential of increasing the thermodynamic efficiency thereof. These actions allow to integrate the computational

algorithms into software used in engineering practice. Integration into popular software would increase the accessibility and applicability of thermodynamic methods.

The defended statements

1. Thermodynamic seasonal efficiency (TSE) is a suitable measure for expressing the sustainability index of a thermohydrodynamic system. The proposed method enables to analyze and identify critical time periods and factors that contribute to the decreasing efficiency of a system.
2. Increasing the level of the detail of the modelled systems enables to ensure that the analysis process is efficient. Focusing on the factors that influence the TSE the most allows to increase the efficiency of the analysis process by maintaining the same effectiveness.
3. The developed reference system with benchmark performances allows objective comparison and understanding of the obtained TSE. Information about thermohydrodynamic processes and entropy generation allows to define the maximum efficiency of components.

Approval of the research findings

9 scientific articles have been published on the topic of the thesis: 2 in scientific journals which are included in the *Clarivate Analytics Web of Science* database and have ISI IF (Martinaitis et al. 2017; Januševičius et al. 2019), 1 in international conference proceedings, referenced in the *Clarivate Analytics* database *Proceedings* (Januševičius et al. 2014, Januševičius et al. 2016). 6 referred in other international databases (Januševičius et al. 2016; Januševičius et al. 2015; Januševičius, Streckienė 2015; Januševičius, Januševičius et al. 2014a Streckienė 2013; Bielskus et al. 2013). 2 in conference presentation materials (Januševičius et al. 2017, Januševičius et al. 2014).

The results of the thesis were presented in 3 international scientific conferences in Lithuania and other countries:

- 9th International Conference “Environmental Engineering” 2014 Vilnius, Lithuania.
- International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2015; Riga, Latvia
- The Sixth International Symposium on Energy Challenges and Mechanics - towards a big picture, Inverness, Scotland, UK

The structure of the dissertation

The thesis consists of the introduction, three chapters, general conclusions and eleven appendices.

The volume of the thesis is 128 pages excluding appendices. 79 numbered equations, 57 figures and 20 tables were used in the text. More than 170 literature sources were used when writing the thesis.

1. The methods used to assess and improve thermohydrodynamic loops

Performance-based design (CIB 1982) can be defined as a process that employs simulation and modelling techniques (Gogi et al. 2015, Robinson 2015). The outcomes are assessed and if they meet the requirements, the process is completed. If requirements are not met, a more detailed analysis should be performed.

Thermodynamic analysis is the most suitable tool to perform the assessment and analysis of a thermohydrodynamic contour system. Measures involving the second law of thermodynamics (SLT) combined with measures involving the first law of thermodynamics (FLT) provide useful information. The methods based on different laws of thermodynamics have their differences and raise ongoing discussions why it is better to use SLT instead of FLT. Despite the popularity of the SLT and the increasing number of related research papers, literature analysis reveals an application gap in engineering practice. The main gaps addressed in this thesis are the following: the lack of value proposition; limited knowledge on how to increase efficiency with TA; insufficient maturity level of the methods; lack of software applications; unclear assumptions about dead-state condition selection; lack of popularity within the engineering community; unknown limitations of the application of the mathematical model. While there are more causes of this gap, this thesis mostly focuses on those listed above.

The application of various methods depends on the modelling depth which in this thesis is defined as modelling dimensions. It can be concluded that the most important dimensions are system decomposition, complexity of the simulation model and time period.

The efficiency and resultativeness of the analysis process is explored from the perspective of value engineering and LEAN thinking. Applying techniques used in such methodologies may increase the effectiveness and efficiency. Uncertainty is also addressed as an important aspect due to its influence on the quality of decisions made in the design process.

2. Thermodynamic seasonal efficiency assessment and method for increasing performance

This chapter focuses on defining the developed thermodynamic seasonal efficiency (TSE) for a thermohydrodynamic loop system and explaining the workflow of the method for improvement search of system TSE the applied thermodynamic analysis methods are explained and expressions of individual component efficiencies are given.

For individual control volume, the thermodynamic seasonal efficiency (TSE) could be expressed as the ratio of the sum of incoming and outgoing exergy flows. This expression is transformed into its alternative that expresses the TSE as a sum of time-step efficiency and weight factor product.

$$TSE = \frac{\sum_{i=0}^n (Ex_{out,i})}{\sum_{i=0}^n (Ex_{in,i})} = \sum_{i=0}^n (\eta_{i,k} \cdot C_{i,k}). \quad (S1)$$

This modified expression of the TSE integrated into the calculation workflow unlocks the possibility to analyze the variation in time step efficiency and, by employing the weight factor, to analyze which time steps have the most influence on the overall TSE value.

Alternative formations were expressed for parallel control volumes and energy chains where components are lined in series and parallel configurations. This proposed method of expressing TSE enables to analyze the influence on seasonal performance from various perspectives – which time step has highest impact on the performance or which part (subsystem, component) of the system is preventing the whole system from achieving better performance.

In order to understand the degree of the TSE of a system or separate subsystems it is necessary to compare obtained results to reference values. The reference is formed by calculating the best and worst case benchmark values. The worst case is understood as electrical heat production and minimum efficiency level of cooling (according to the EU requirements), high temperature differences in conditioning terminal and high-friction pressure losses in hydronic and duct networks. Best case is the complete opposite – low-temperature heating and high-temperature cooling with reasonably low pressure losses. This reference system serves as guidelines for how the current system could be upgraded in order to become more efficient.

In order to explore the analyzed system in various ways, multiple techniques of thermodynamic analysis can be adopted. Such techniques provide different types of data, helping to gain insight about interactions and influence aspects that any single method is not able to provide. In this thesis, multiple methods are used with adaptations in order to meet the needs of the thermohydrodynamic loops system and the level of simulation detail:

Advanced thermodynamic analysis – helps to identify interactions between components and component groups. The guidelines on how to use it for the analyzed case is provided in an annex.

Local entropy generation – pinpoints the entropy generation in component internal configuration and helps to understand, analyze and optimize the primary causes of entropy generation. The integration of mathematical model to Computational Fluid Dynamics software is adopted (Herwig, Kock 2005)

Entropy generation minimization – enables to identify the thermodynamic efficiency limit.

Real improvement potential – the measure introduced in this thesis that defines the potential for improvement which can be achieved if thermodynamic efficiency reaches its maximum.

The employed methods generate the information required to make decisions for further system analysis, leading to the improvement of the TSE factor.

Due to the limitations of the application of the mathematical model, situations arise when typical efficiency expressions do not work. This happens with heat exchange devices (borehole heat exchangers, heat recovery devices, heating and cooling terminals) when dead-state temperature moves across the working fluid or source/sink boundary conditions. The models of efficiency expressions are given in *Annex B*.

The action sequence used to increase the TSE factor can be sequenced as a workflow. This workflow is combined by taking into account the principles of value engineering and

LEAN thinking. The sequence takes into account the level of complexity of the model and the aspects of system decomposition which are important when aiming to apply different methods of thermodynamic analysis.

The workflow of the method summarizes the actions at different levels of system decomposition and complexity of simulation. This workflow is shown in Figure S2.1.

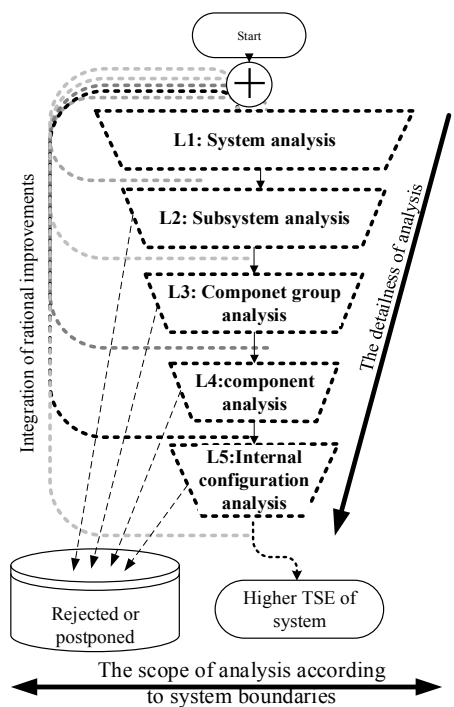


Fig. S2.1. Diagram of the TSE improvement process

Table S2.1. Priority factors for decision-making

Indicator	Purpose
P0	Defines which alternative is the most suitable according to the TSE value
P1	Helps to rank the most influential time steps
P2	Identifies the most influential part of a higher-level system
P3	Identifies the part that has negative influence on other group elements
P4	Ranks the components by real potential for improvement

The main options for actions on the identified barriers for reaching higher efficiency for the majority of steps are: a) further analysis; b) making no changes c) making changes;

d) postponing. This helps to summarize the decision-making process happening at every level of system decomposition, as shown in Figure S2.2.

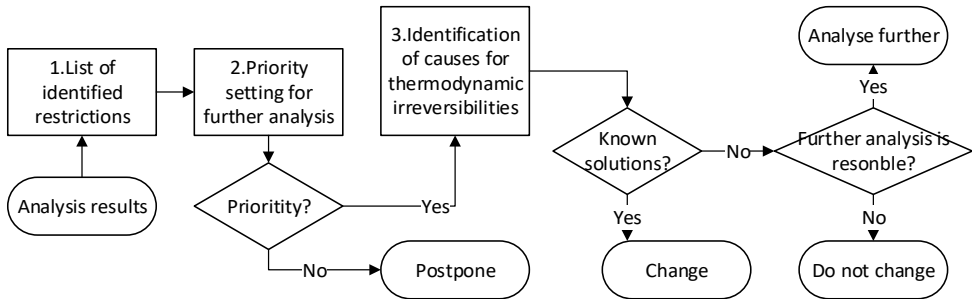


Fig. S2.2. Decision-making workflow

The decision is based on indicators which help to define priorities and enable to utilize the available resources in a more efficient way. At separate levels of system decomposition, different indicators should be employed. The list of indicators is listed in Table S2.1.

By using the given indicators, a grounded decision regarding which issues should be addressed can be made. The proposed way of dealing with given problems aims to reduce the computational costs and processing efforts required to come up with a solution leading to the increased TSE parameter.

3. Application of methods for assessing thermodynamic seasonal efficiency and increasing performance

A thermohydrodynamic system serving a synthetic 2660 m² building has been modeled. The model of the building is simulated in IES VE. The climate conditions are determined by TMY file representing the climate conditions in Kaunas, Lithuania. The building envelope meets the requirements for the A+ energy efficiency class. Further analysis was performed using TRNSYS along with the MATLAB environment.

At the first decomposition level (L1) the system is seen as a single control volume serving the needs of building energy services. At this stage of the analysis of the system the TSE factor that equals 0.228 is defined. It is combined from time step efficiencies and the product of the weight factor C_i . The time series data is shown in Figure S3.1. The set of priority factors (P1) helps to rank the calculation time steps in terms of their influence on the TSE value. As a result, actions to increase the efficiencies at specific time steps can be taken. In order to understand the degree of system quality, it is compared to the worst case (TSE = 0.072) and best case (TSE = 0.488) scenarios. This comparison helps new practitioners to address the need of improvement in a more justified way.

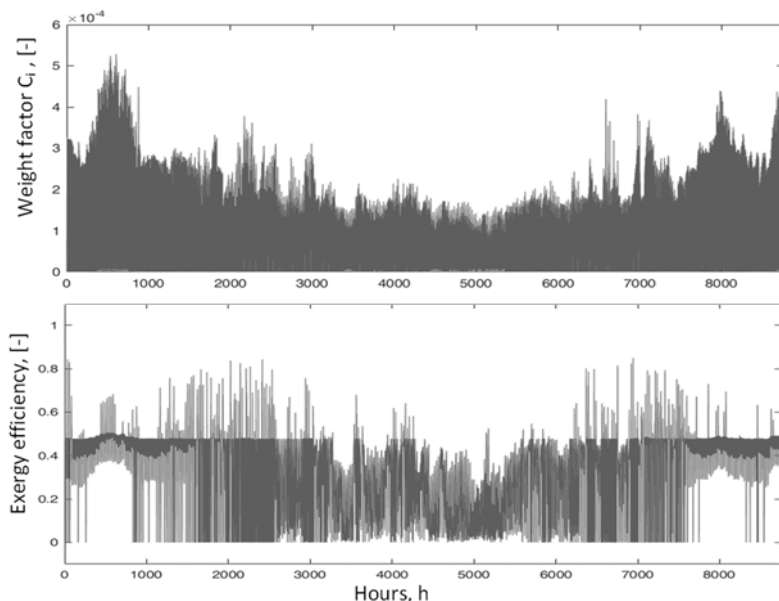


Fig. S3.1. The annual variation in thermodynamic efficiency (η_n) and weight factor (C_i) of the system

These graphs allow to visually inspect the extremes of efficiency variation and identify seasonal trends. The results are valid if step efficiency is within the range of 0 to 1 and the sum of weight factors equals 1.

In the next step, the system is subdivided into subsystems (L2). This action enables to identify TSE factors for separate energy services. The model of the TRNSYS simulation is shown in Figure S3.2.

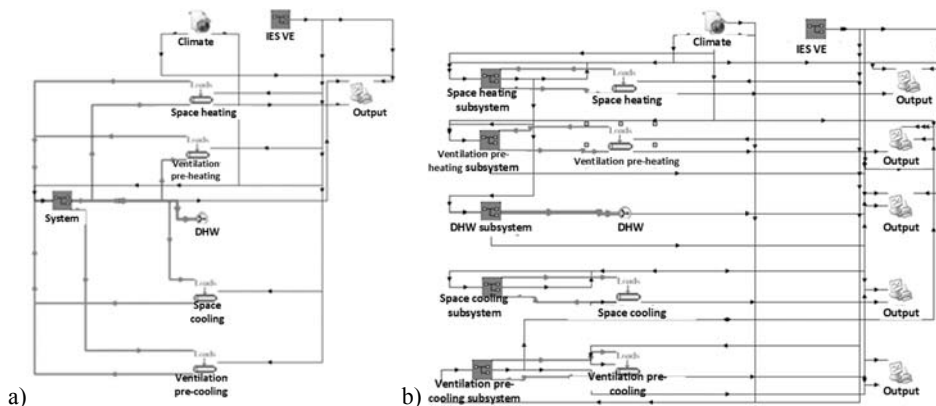


Fig. S3.2. A model of a thermohydrodynamic loop system in the TRNSYS environment:
a) system-level and b) subsystem-level models

TSE parameters for each separate subsystem are shown in Figure S3.3. These parameters are compared to the benchmark values in order to determine how far or close these values are from worst and best case scenarios. By using the priority factor P2, the subsystem with the highest negative influence on the TSE parameter of the system is identified. This is graphically represented in the Figure S3.3.

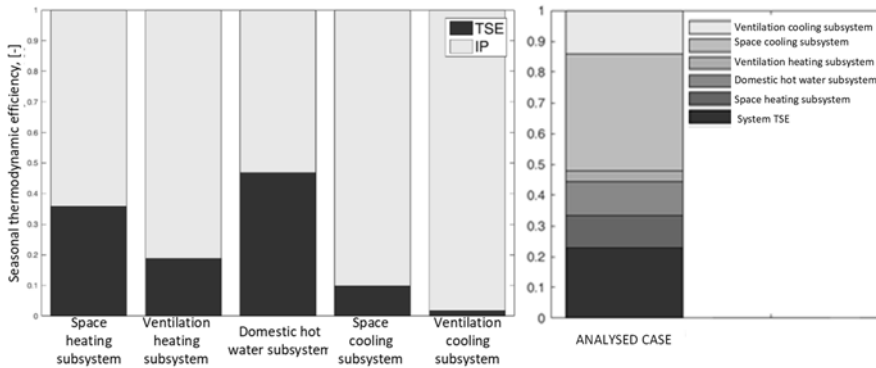


Fig. S3.3. The thermodynamic seasonal efficiency parameter of subsystems and the influence on the overall system performance

In this step it becomes clear that space cooling and ventilation air supply subsystems have the largest negative impact on the TSE of systems. In order to increase the TSE, alternative subsystem options are considered and examined. By applying the priority factor P0, the best out of three options can be selected: compression cooling chiller (TSE = 0.0975); geothermal passive cooling (TSE = 0.786); adsorption cooling (TSE = 0.124).

The next stage explores the ways to improve a space cooling subsystem seen as a set of component groups (L3). The available option for space cooling is examined in terms of TSE parameters for separate groups and advanced exergy analysis is performed. The subdivision of the subsystem can be seen in Figure S3.4.

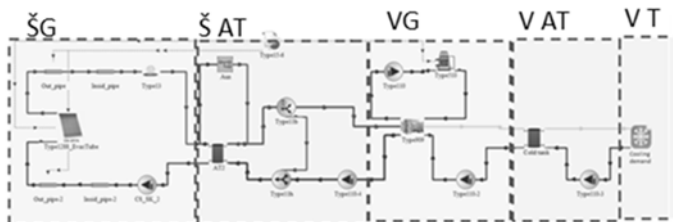


Fig. S3.4. Subdivision of TRNSYS model used for modelling a cooling system with an adsorption cooling machine

Notes: ŠG – heat production group; ŠAT – Heat accumulation group; VG – cooling production group; VAT – Cooling accumulation group; VT – cooling terminal group.

The subsystem or component group can be subdivided into components. This action not only increases computational costs, but poses the challenge of individual component assessment. At this stage (L4), the newly proposed methods were used for heat exchangers with different boundary conditions and accumulation tanks. The created expressions of thermodynamic efficiency are listed in Annex B.

At the last stage of method application (L5), a detailed analysis of local entropy production should be performed. After performing the simulation of computational fluid dynamics, the post-processing of primary variables (temperature, pressure) reveals the locations of entropy generation concentrations in the component geometry. The entropy generation field caused by pressure and temperature differences is shown in Figure S3.5.

The results show the concentrations of entropy generation and how this phenomenon evolves over time. The distratification effects cause the main entropy production.

In order to define the benefit of applying the proposed method instead of the conventional way of analyzing the system at each decomposition equally, the quantification method is required. By applying the methods of computational effort and analytical hierarchy process, a comparison is drawn. The cumulative effort is compared in terms of model creation, pre-aggregation, simulation and post-production with the interpretation of results.

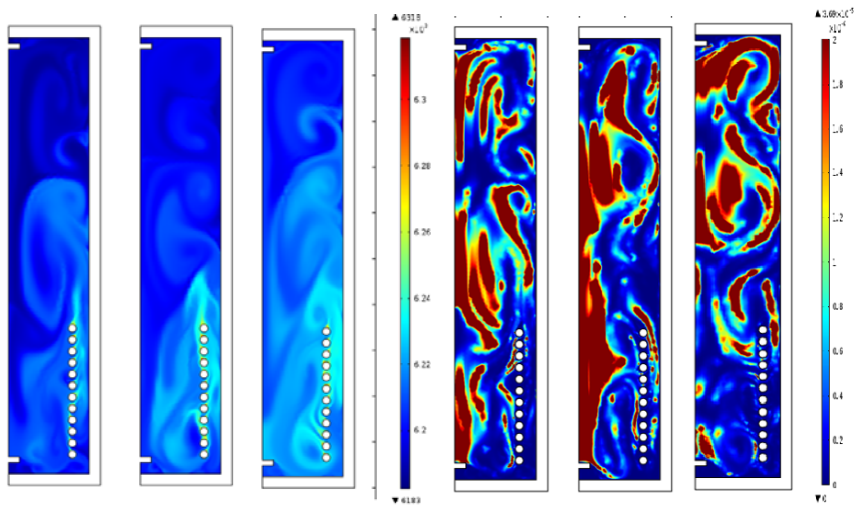


Fig. S3.5. The variation of SgenD (3 pictures on the left) and SgenC (3 pictures on the right) in transient process at the accumulation tank

Such comparison of approaches defines the difference between methods and is not suitable for expressing the overall resource costs of model analysis. As seen in Figure S3.6, the first three levels of detail (L1-L3) have similar computational costs, but for L4 and L5 there is a 1,2 to 2,6 times and 3 to 10 time difference, respectively.

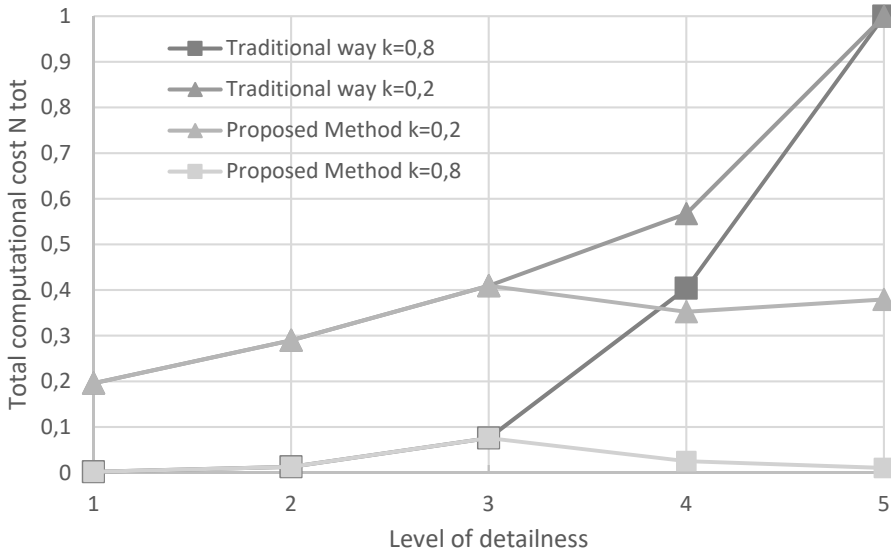


Fig. S3.6. The demand of computational and time costs in comparison to the level of detail of the system model

By employing computational cost comparison, it can be concluded that the proposed method requires lower computational costs to analyze the system at a high level of system decomposition. This enables to utilize computational and time costs more effectively by focusing on the aspects that have the most influence on the TSE factor of the systems.

General conclusions

1. The analysis of scientific literature showed that there is a gap in the application of applied thermodynamic analysis between scientific and practical areas. The obstacles for application were determined and ranked. The main obstacles in terms of this gap are: the results do not reveal the practical value of the methods, it is unclear how the systems should be improved by applying thermodynamic analysis, there is a lack of computational software, and there are varying interpretations of ambient conditions and so on.

2. The designed method for calculating thermodynamic seasonal efficiency is suitable for performing the analysis at changing ambient conditions. The designed method can be used to aggregate the results of stationary and dynamic modelling into a value that expresses the seasonal efficiency (TSE). The weight factors, obtained by using the method, are used to identify the critical periods and to establish the priorities of a more detailed analysis. The action sequence for aggregating the efficiency indicators of separate components helps to express the thermodynamic seasonal efficiency of the whole chain.

3. The designed method for improving thermodynamic seasonal efficiency helps to consistently select the required level of detail for the model. By applying the method, lower computational and time costs are achieved. At different levels of analysis, the

reduction of cost can reach up to 2 to 10 times when compared to the case when all elements of the system are analyzed without distinction.

4. The designed method helps to systematically analyze complex energy systems by using quantitative and qualitative parameters. By applying the method, the level of detail of the analysis is increased gradually while the methods for determining priorities allow to focus on elements and time steps that influence the seasonal efficiency of the system the most. The value of potential for actual improvement used in the method helps to express the realistically possible limit of improving the component and set the priorities for a more expansive analysis.

5. By applying the method, the TSE indicator of the system was increased from 0.22 to 0.37. In this case, the amount of exergy used drops 19.2% from the initial amount. The reference scale, comprised of reference values, allows to analyze the fluctuation margins of TSE indicators in terms of a specific system or subsystem. In the analyzed case, the efficiency margins fluctuate within the range from 0.06 (the reference for a *bad* system) to 0.49 (the reference for a *good* system).

In conclusion, the issues analyzed in the thesis contribute to planning sustainable energy use in the energy systems of the future that use fluids as energy carriers. The provided systematic process of applying the methods of thermodynamic analysis that uses the action sequence for increasing the efficiency of a system can be used as an example of good practice in terms of standardizing the analysis of complex systems.

Recommendations

1. The identified thermodynamic analysis application gap should be investigated further. That would help to concentrate efforts of researchers and enable wider application of SLT methods and grow the maturity level of SLT based methods.
2. The presented thermodynamic analysis application framework gives guidelines how the system performance could be improved. This way could be seen as a good practice example, which could be adopted to other complex systems analysis cases and adopted to engineering practices.
3. The developed thermodynamic seasonal efficiency assessment method and defined calculation workflow could be integrated to software solutions. By joining the TSE method and simulation tools enables to have the technology suitable for assessing the thermohydrodynamic loop systems more effectively. In this way, fully functional technology is developed to successfully apply thermodynamic analysis focused to system performance improvement.

Priedai³

- A priedas.** Ekserginės analizės taikymą mininčių straipsnių sąrašas
- B priedas.** Komponentų termodinaminės analizės modeliai
- C priedas.** Termodinaminio sezoninio efektyvumo apibrėžimas
- D priedas.** Komponentų grandinės integracijos koeficientas
- E priedas.** Taikomosios termodinaminės analizės metodai (santrauka)
- F priedas.** Energetinių paslaugų kokybinių poreikių apibrėžimas
- G priedas.** Energetinių paslaugų generavimo srautų kokybinės išraiškos
- H priedas.** Sistemų etalonų charakteristikos
- I priedas.** Sąžiningumo deklaracija
- J priedas.** Bendra autorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą mokslo daktaro disertacijoje
- K priedas.** Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Karolis JANUŠEVIČIUS

TERMODINAMINĖS ANALIZĖS TAIKYMAS
TERMOHIDRODINAMINIŲ KONTŪRŲ SISTEMOMS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Mechanikos inžinerija (T 009)

APPLICATION OF THERMODYNAMIC ANALYSIS
FOR THERMOHYDRODYNAMIC LOOPS SYSTEMS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Mechanical Engineering (T 009)

2019 05 09. 15,0 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius